



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



JEAN KARLOS CÂMARA

SIMULAÇÃO DO USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES
ALIMENTADOS COM BIODIESEL

OURO PRETO - MG
2025

JEAN KARLOS CÂMARA

jean.camara@aluno.ufop.edu.br

**SIMULAÇÃO DO USO DE HIDROGÊNIO EM MOTORES
ALIMENTADOS COM BIODIESEL**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Elisangela Martins Leal

OURO PRETO – MG

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C172s Câmara, Jean Karlos.
Simulação do uso de hidrogênio em motores alimentados com biodiesel. [manuscrito] / Jean Karlos Câmara. - 2025.
72 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisangela Martins Leal.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Combustíveis para motores - Biodiesel. 2. Combustíveis para motores - Hidrogênio. 3. Motores a diesel. I. Leal, Elisangela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jean Karlos Câmara

Simulação Do Uso De Hidrogênio Em Motores Alimentados Com Biodiesel

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 7 de agosto de 2025

Membros da banca

D.Sc. Elisângela Martins Leal - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. Ana Maura Araújo Rocha - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc. Claudio Marcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/08/2025



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/08/2025, às 18:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0963003** e o código CRC **B60F7BA6**.

AGRADECIMENTO

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso marca o encerramento de uma etapa fundamental da minha vida acadêmica. Ao longo dessa jornada, tive o privilégio de contar com o apoio de pessoas que foram essenciais para que este momento se tornasse possível. Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder força, sabedoria e coragem para superar os desafios ao longo da caminhada. Sem Sua presença constante, esta conquista não teria sido possível. Agradeço profundamente à minha família, pelo amor, apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim. Vocês foram meu ponto de apoio e minha maior motivação durante toda a graduação. À minha orientadora, DSc. Elisângela Martins Leal, agradeço pela orientação dedicada, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação profissional. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste TCC, deixo aqui meu sincero agradecimento.

*"Os engenheiros gostam de resolver problemas. Se não
houver problemas à vista, eles criam os seus".*

Scott Adams

RESUMO

Este trabalho analisa o desempenho térmico de um motor de combustão interna de ignição por compressão operando com misturas de biodiesel e hidrogênio, por meio de simulações no *software* Diesel RK e comparação com dados experimentais obtidos para operação com diesel. O objetivo principal é avaliar os efeitos da adição de hidrogênio, em diferentes proporções, ao biodiesel sobre parâmetros como torque, potência, consumo específico de combustível e emissões. O estudo parte de uma fundamentação teórica sobre motores Diesel, propriedades do hidrogênio e biodiesel, além de explorar as vantagens e desafios técnicos do uso combinado desses combustíveis. A avaliação do desempenho do motor é conduzida em duas etapas. A primeira consiste em uma análise numérica, na qual os dados do motor são coletados e as simulações realizadas no *software* Diesel RK. Nessa fase, efetuam-se os cálculos considerando diferentes proporções de hidrogênio e biodiesel, iniciando com biodiesel puro e aumentando a concentração de hidrogênio em incrementos de 10% até atingir o limite máximo de 30%, estabelecido devido a restrições de temperatura de operação do motor. Em seguida, os resultados simulados são comparados com dados experimentais de operação com diesel, visando verificar tendências e comportamentos previstos pelo modelo. Os resultados indicam que a adição de hidrogênio pode melhorar o desempenho do motor e reduzir as emissões de CO₂, especialmente em proporções de até 30%, mantendo a estabilidade operacional. O estudo conclui que a utilização de hidrogênio como aditivo ao biodiesel apresenta potencial para promover maior eficiência energética e menor impacto ambiental, embora desafios técnicos ainda existam quanto ao armazenamento e controle da mistura. O uso do *software* Diesel RK mostra-se eficaz para previsão de desempenho e análise comparativa, permitindo análises detalhadas que fornecem bases sólidas para estudos futuros voltados à otimização desses motores.

Palavras-chave: biodiesel, hidrogênio, motor Diesel, simulação, emissões.

ABSTRACT

This work analyzes the thermal performance of a compression-ignition internal combustion engine operating with mixtures of biodiesel and hydrogen through simulations performed in Diesel RK software and comparison with experimental data obtained for diesel operation. The main objective is to evaluate the effects of adding hydrogen, in different proportions, to biodiesel on parameters such as torque, power, specific fuel consumption, and emissions. The study begins with a theoretical foundation on Diesel engines, as well as the properties of hydrogen and biodiesel, and explores the advantages and technical challenges of using these fuels in combination. The engine performance evaluation is conducted in two stages. The first stage consisted of a numerical analysis, in which engine data are collected and simulations are performed using Diesel RK software. In this phase, calculations are carried out considering different proportions of hydrogen and biodiesel, starting with pure biodiesel and increasing the hydrogen concentration in 10% increments up to a maximum limit of 30%, established due to engine operating temperature constraints. Subsequently, the simulated results are compared with experimental data for diesel operation, in order to verify trends and behaviors predicted by the model. The results indicate that the addition of hydrogen can improve engine performance and reduce CO₂ emissions, especially in proportions of up to 30%, while maintaining operational stability. The study concludes that the use of hydrogen as an additive to biodiesel has the potential to promote greater energy efficiency and lower environmental impact, although technical challenges remain regarding storage and mixture control. The use of Diesel RK software proves effective for performance prediction and comparative analysis, enabling detailed evaluations that provide a solid foundation for future studies aimed at optimizing these engines.

Keywords: biodiesel, hydrogen, Diesel engine, simulation, emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação do ciclo Diesel com Otto no motor de quatro tempos.	5
Figura 2: Ciclo de 4 tempos em um motor de combustão de ignição por centelha.....	7
Figura 3: Funcionamento do motor do ciclo Diesel.	9
Figura 4: Diagramas P-V e T-S do ciclo Diesel.	11
Figura 5: Comparação de parâmetros relevantes (valores médios) em óleos vegetais e gasóleo de origem fóssil.	18
Figura 6: Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.....	27
Figura 7: Telas de configuração do Diesel RK.....	28
Figura 8: Fluxograma dos procedimentos da simulação no software Diesel RK.....	29
Figura 9: Curvas de desempenho do motor.	34
Figura 10: Valores para torque e potência do fabricante e da simulação.	35
Figura 11: Resultados de Torque e Potência para o MCI (fabricante, e simulação do óleo diesel e biodiesel).....	38
Figura 12: Comparação do torque em função da proporção de hidrogênio.	42
Figura 13: Comparação da potência em função da proporção de hidrogênio.	43
Figura 14: Comparação do consumo específico de combustível em função da proporção de hidrogênio.....	44
Figura 15: Comparação das emissões de NOx em função da proporção de hidrogênio.	46
Figura 16: Comparação das emissões de CO ₂ em função da proporção de hidrogênio.	48
Figura 17: Comparação do torque obtido por simulação, experimento prático e dados do fabricante em função da rotação.	50
Figura 18: Comparação da potência obtida por simulação, experimento prático e dados do fabricante em função da rotação.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação das curvas no diagrama pressão <i>versus</i> volume dos ciclos Diesel e Otto.	6
Tabela 2: Poder calorífico dos combustíveis.....	15
Tabela 3: Propriedades do óleo diesel e biodiesel.....	17
Tabela 4: Variáveis e Indicadores	30
Tabela 5: Ficha Técnica motor BFD 5.0CV - PRO.....	33
Tabela 6: Valores para torque e potência reais e simulados pelo software Diesel RK.	35
Tabela 7: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com 100% Biodiesel e comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.....	37
Tabela 8: Resultados de simulação para as emissões (NOx e CO ₂) do MCI com biodiesel e óleo diesel.....	37
Tabela 9: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com o B90H10, comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.....	39
Tabela 10: Resultados de simulação para as emissões (NOx e CO ₂) do MCI com B90H10 e óleo diesel.....	39
Tabela 11: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com o B80H20, comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.....	40
Tabela 12: Resultados de simulação para as emissões (NOx e CO ₂) do MCI com B80H20 e óleo diesel.....	40
Tabela 13: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com o B70H30, comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.....	41
Tabela 14: Resultados de simulação para as emissões (NOx e CO ₂) do MCI com B70H30 e óleo diesel.....	41

LISTA DE SIMBOLOS

D: Diâmetro do cilindro [mm]

H₂: Hidrogênio

n: Rotação do motor [rpm]

N: Número de cilindros [adimensional]

NO_x: Emissão de óxidos de nitrogênio [ppm ou g/kWh]

P: Potência [kW ou CV]

PCI: Poder calorífico inferior [MJ/kg]

PCS: Poder calorífico superior [MJ/kg]

PI: Ponto de inflamação [K]

p_{me}: Pressão média efetiva [MPa]

PMI: Ponto Morto Inferior

PMS: Ponto Morto Superior

Q: Quantidade de calor (adicionado ou rejeitado) [kJ]

RC: Relação de compressão [adimensional]

S: Curso do pistão [mm]

T: Torque [N·m]

V: Volume [cm³]

W_c: Trabalho líquido no ciclo [kJ]

η: Eficiência térmica [%]

ρ: Massa específica [kg/m³]

ṁ: Vazão mássica [kg/h ou g/s]

MCI: Motor de combustão interna

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Motores de Combustão Interna	5
2.1.1	MCI de Ignição Por Compressão	8
2.2	Hidrogênio	14
2.3	Biodiesel.....	16
2.3.1	Biocombustível de 1ª geração	17
2.3.2	Biocombustível de 2ª geração	18
2.4	Uso de Misturas em MCI.....	19
2.5	Análise Técnica (<i>Software Diesel RK</i>)	20
2.6	Análise Experimental	22
2.7	Considerações Finais.....	23
3	METODOLOGIA	24
3.1	Tipo de pesquisa.....	24
3.2	Materiais e Métodos.....	25
3.3	Variáveis e Indicadores	30
3.4	Instrumento de Coleta de Dados	31
3.5	Tabulação dos Dados	31
3.6	Considerações Finais do Capítulo.....	32
4	RESULTADOS.....	33
4.1	Validação do Modelo do MCI.....	33
4.2	Simulação do MCI com Biodiesel e Suas Misturas de Hidrogênio	36
4.2.1	Simulação usando 100% Biodiesel	36
4.2.2	Simulação usando 90% Biodiesel e 10% Hidrogênio (B90H10).....	39
4.2.3	Simulação usando 80% Biodiesel e 20% Hidrogênio (B80H20).....	40
4.2.4	Simulação usando 70% Biodiesel e 30% Hidrogênio (B70H30).....	41

4.2.5 Comparação dos Resultados da Simulação em Função da Adição de Hidrogênio.....	42
4.2.6 Comparação utilizando o Diesel como combustível, entre Simulação, Dados Experimentais e Especificações do Fabricante.....	49
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	53
5.1 Conclusão.....	53
5.2 Recomendações.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se o tema escolhido para o trabalho de conclusão de curso, buscando explicitar e facilitar a compreensão dos principais aspectos relacionados ao assunto, bem como definir o problema que motivou a realização desta pesquisa. Em seguida, são expostos a formulação do problema, a justificativa, os objetivos do estudo e a estrutura geral do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

De acordo com Çengel e Boles (2013), os motores de combustão interna desempenham um papel essencial na indústria e no transporte, embora enfrentem desafios cada vez maiores relacionados à eficiência energética e às emissões de poluentes. Nesse cenário, a busca por alternativas mais sustentáveis e eficientes tem incentivado o uso de combustíveis renováveis, como o biodiesel, e de fontes de energia limpas, como o hidrogênio, o qual apresenta alta densidade energética e combustão livre de carbono.

Conforme apontado por Ramos (2017), o biodiesel, produzido a partir de fontes renováveis como óleos vegetais e gorduras animais, destaca-se por suas propriedades ecológicas e pela capacidade de reduzir emissões de particulados e enxofre. Contudo, o autor ressalta que o combustível apresenta algumas limitações, como maior viscosidade e menor poder calorífico em comparação ao óleo diesel. De acordo com Planejativo (2016), o poder calorífico do diesel é de 38,8 MJ/L, enquanto o do biodiesel é de 33,3 MJ/L. Em relação à viscosidade, o diesel apresenta valor de 3,9 mm²/s e o biodiesel de 4,7 mm²/s.

Santos e Souza (2018) argumentam que o hidrogênio, por sua vez, possui alta eficiência térmica e queima limpa, características que o tornam uma alternativa promissora. Entretanto, eles destacam que desafios relacionados ao armazenamento e à produção do hidrogênio ainda precisam ser superados. Nesse contexto, a combinação do biodiesel com o hidrogênio surge como uma estratégia inovadora para melhorar o desempenho dos motores de combustão interna e reduzir as emissões de gases poluentes.

Apesar do potencial dessas misturas, ainda há lacunas importantes no entendimento do impacto das proporções de hidrogênio e biodiesel no desempenho dos motores. Questões como eficiência térmica, consumo específico de combustível e emissões precisam ser mais bem exploradas. Além disso, ajustes em sistemas de injeção e ignição são essenciais para adaptar os motores a essas misturas.

Nesse contexto, em uma análise teórica, o *software* Diesel-RK destaca-se como uma ferramenta poderosa para modelar os processos de combustão, considerando propriedades específicas dos combustíveis e condições reais de operação. Sua escolha neste estudo justifica-se pela capacidade de realizar análises detalhadas do impacto das misturas de hidrogênio e biodiesel, fornecendo dados confiáveis, visto que a comparação dos dados foi utilizada para validar os resultados obtidos com a simulação e os dados do fabricante, bem como otimizar o desempenho dos motores.

Modelagens matemáticas e computacionais, aliadas à análise experimental, são indispensáveis para compreender as interações complexas entre esses combustíveis. Autores como Chapra e Canale (2016) enfatizam a importância de métodos numéricos para simular sistemas térmicos, enquanto Ramos (2017) destaca os benefícios ambientais e socioeconômicos do biodiesel.

Além disso, a definição da proporção ideal de mistura é importante para equilibrar eficiência energética, redução de emissões e viabilidade econômica. Esses fatores são essenciais para integrar estudos teóricos e experimentais e fornecer soluções viáveis para os desafios ambientais e técnicos do setor.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa teórica e numérica por meio do *software* Diesel-RK dos efeitos do uso de misturas de hidrogênio e biodiesel em motores de combustão interna. Dessa forma, a questão central da pesquisa é:

Como a adição de hidrogênio ao biodiesel influencia o desempenho térmico, o consumo de combustível e as emissões de um motor de ignição por compressão?

1.2 Justificativa

Diante desse cenário, a crescente necessidade de soluções sustentáveis no setor automotivo tem impulsionado pesquisas sobre combustíveis alternativos capazes de mitigar as emissões de poluentes e aumentar a eficiência energética dos motores de combustão interna. Conforme enfatizado por Ramos (2017), o biodiesel se destaca por sua origem renovável e por proporcionar benefícios ambientais relevantes, como a diminuição na liberação de compostos de enxofre e material particulado. Contudo, o autor também observa que certas propriedades físico-químicas, como a viscosidade elevada e o menor conteúdo energético por litro, impõem desafios à sua plena substituição do diesel, demandando medidas complementares para melhorar seu desempenho nos motores.

Por sua vez, Santos e Souza (2018) reconhecem o hidrogênio como um vetor energético com grande potencial, em razão de sua elevada energia por unidade de massa e da combustão sem geração de resíduos poluentes. Apesar dessas qualidades, os autores indicam que ainda persistem limitações práticas, sobretudo no que diz respeito às formas viáveis de armazená-lo e produzi-lo de maneira eficiente e segura.

Nesse contexto, a combinação de biodiesel e hidrogênio é vista como uma estratégia inovadora, que une os benefícios de ambas as fontes energéticas enquanto minimiza suas limitações. Ao propor o estudo do uso combinado de hidrogênio e biodiesel, este trabalho responde à crescente demanda por tecnologias que conciliem viabilidade econômica, eficiência energética e sustentabilidade ambiental. Dessa forma, alinha-se aos objetivos globais de reduzir impactos ambientais e promover a transição para matrizes energéticas mais limpas, contribuindo para o desenvolvimento de soluções técnicas aplicáveis ao setor automotivo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar os efeitos da adição de hidrogênio ao biodiesel sobre o desempenho térmico de um motor de combustão interna de ignição por compressão, utilizando análises teóricas, numéricas e experimentais.

1.3.2 Específicos

- Revisar os fundamentos termodinâmicos e operacionais dos motores de ignição por compressão e os efeitos das misturas hidrogênio-biodiesel;
- Elaborar um procedimento metodológico para realizar a simulação e experimentos;
- Simular o desempenho de motores utilizando misturas de hidrogênio e biodiesel, com frações de hidrogênio entre 0% e 30%, por meio do *software* Diesel-RK;
- Realizar experimentos práticos para comparar uma faixa dos resultados teóricos, avaliando parâmetros como torque e potência;
- Comparar diferentes proporções de hidrogênio no biodiesel em termos de desempenho, consumo e emissões;
- Concluir e recomendar trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução aos temas abordados ao longo do estudo, englobando a formulação do problema, a definição da pergunta de pesquisa, a justificativa do trabalho e os objetivos gerais e específicos da investigação.

O segundo capítulo fundamenta teoricamente o estudo por meio de uma revisão bibliográfica detalhada, abordando os principais aspectos relacionados ao problema em questão. São explorados temas como motores de combustão interna, com ênfase em motores a diesel, hidrogênio, biodiesel, bem como análises técnicas realizadas com o uso do *software* Diesel RK e experimentos práticos.

No terceiro capítulo, a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa é apresentada de forma clara e objetiva, detalhando as etapas utilizadas para a obtenção dos resultados, com foco na simulação de um motor de combustão interna de ignição por compressão.

O quarto capítulo é dedicado à apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos, tanto por meio do *software* Diesel RK quanto pela análise experimental. Esses dados são avaliados com o objetivo de reforçar a relevância e a contribuição da pesquisa para o campo de estudo.

Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões do trabalho, destacando os principais achados que influenciaram a injeção de combustível e o desempenho termodinâmico do motor de combustão interna ao utilizar a mistura de biodiesel e hidrogênio como combustível. Além disso, são propostas sugestões para o desenvolvimento de estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica que embasa o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, visando consolidar os conceitos essenciais para propor e analisar um método de aprimoramento do desempenho de um motor de combustão interna de ignição por compressão, utilizando misturas de biodiesel e hidrogênio como combustível.

2.1 Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna (MCIs) são dispositivos mecânicos amplamente utilizados em veículos automotivos, equipamentos industriais e sistemas de geração de energia. Eles operam convertendo a energia química contida no combustível em energia mecânica por meio de processos de combustão controlada dentro de uma câmara fechada (HEYWOOD, 1988).

Segundo Heywood (1988), os MCIs podem ser divididos em dois principais tipos, motores de ignição por centelha, que seguem o ciclo termodinâmico Otto, e motores de ignição por compressão, que operam de acordo com o ciclo Diesel. A escolha entre os dois tipos depende de fatores como aplicação, eficiência energética e tipo de combustível. A Figura 1 apresenta a comparação do ciclo Diesel com o ciclo Otto no motor de quatro tempos, com a Tabela 1 explicando a comparação das curvas do diagrama.

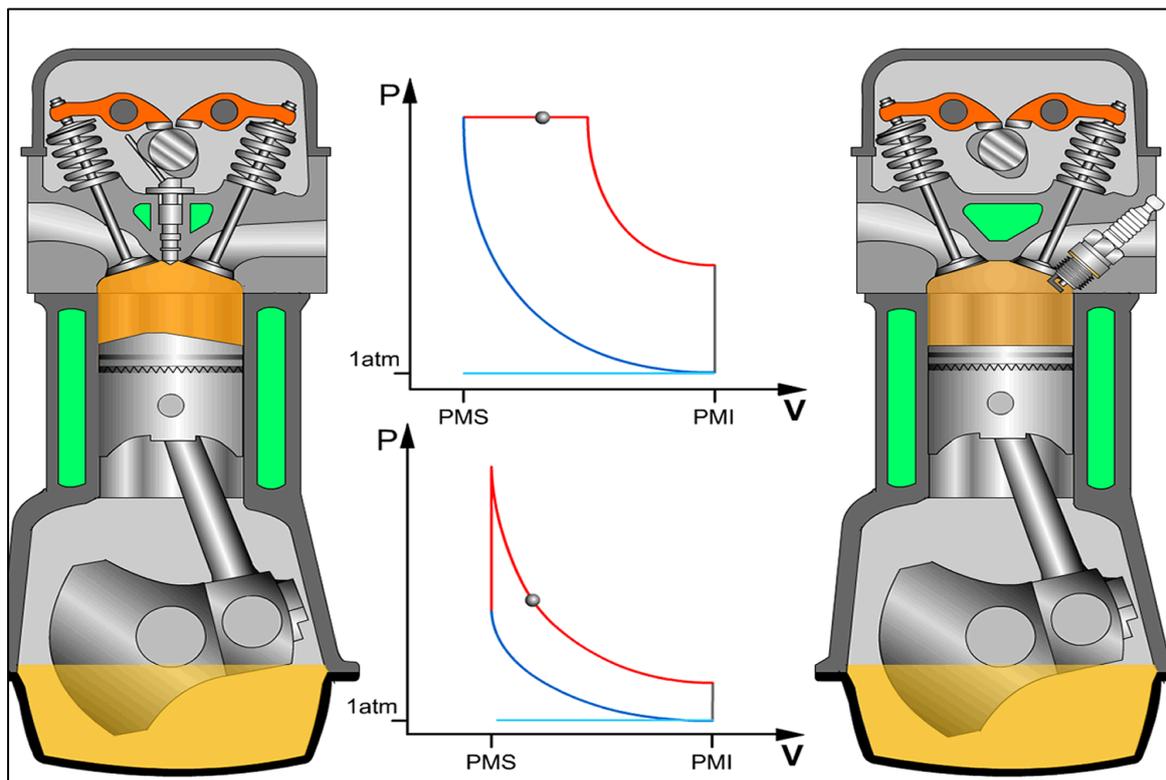


Figura 1: Comparação do ciclo Diesel com Otto no motor de quatro tempos.
Fonte: Eduardo J. Stefanelli (2025).

Stefanelli (2025) apresenta uma comparação interativa que demonstra as relações entre os diversos sistemas de um motor de combustão interna com ignição por injeção de combustível, que desenvolve o ciclo Diesel, e os sistemas de um motor de combustão interna com ignição por fagulha, que opera no ciclo Otto. Além disso, o autor plota, de forma sincronizada, em dois diagramas pressão *versus* volume (Figura 1), aproximações idealizadas das curvas do ciclo Diesel teórico e do ciclo Otto teórico, ou seja, desconsiderando as perdas do sistema, permitindo uma análise comparativa mais detalhada entre os dois ciclos.

Stefanelli (2025), ilustra essa comparação ao apresentar a sobreposição das curvas teóricas dos ciclos Diesel e Otto. A Tabela 1 destaca as diferenças fundamentais entre os dois ciclos, facilitando a compreensão das características de cada um.

Tabela 1: Comparação das curvas no diagrama pressão *versus* volume dos ciclos Diesel e Otto.

Tempo	Ciclo Diesel	Ciclo Otto
Compressão	A taxa de compressão é muito alta, parte da energia mecânica do pistão se transfere para o ar aumentando sua temperatura a ponto de inflamar o combustível injetado.	A taxa de compressão é moderada, e a mistura ar-combustível é comprimida até atingir um ponto próximo à ignição. A queima ocorre por centelha (faísca) gerada pela vela, iniciando a combustão controlada da mistura.
Combustão	A queima do combustível é lenta, sua expansão desloca o pistão aumentando o volume à pressão constante, fornecendo torque.	Uma fagulha inicia a combustão, uma explosão que aumenta a pressão e a temperatura, impele o cilindro, fornecendo potência.
Expansão	Fim da combustão, a pressão reduz sem troca de energia térmica, pelo aumento do volume.	Abertura da válvula de escape, os gases resultantes da combustão escapam e a pressão no interior do cilindro retorna a uma atmosfera.
Exaustão	Abertura da válvula de escape, os gases escapam e a pressão no interior do cilindro retorna a uma atmosfera.	A abertura da válvula de escape libera os gases queimados rapidamente, reduzindo a pressão a volume constante
Obs.	O trabalho realizado por este ciclo é maior que no ciclo Otto, a área do interior do gráfico é maior, e o torque também é maior, o que permite isto é a velocidade da queima do combustível, lenta, não o fato dele ser injetado. A injeção do combustível é para evitar que ele se inflame antes do momento crítico (pré-ignição).	A rápida queima do combustível confere as principais características dos motores que funcionam sob este ciclo, a potência e a rápida variação de velocidade. O combustível é inflamável à temperatura ambiente e o motor opera a taxas de compressão bem inferiores às do ciclo Diesel, permitindo motores mais leves e de menor complexidade.

Fonte: Adaptado de Eduardo J. Stefanelli (2025).

Brunetti (2016) destaca que a eficiência de um motor está intimamente ligada à sua taxa de compressão e à qualidade da mistura ar-combustível, no ciclo Otto, a eficiência aumenta com a elevação da taxa de compressão, embora níveis elevados possam levar à ocorrência de detonação, especialmente em combustíveis de baixa octanagem. O mesmo autor fala que no ciclo Diesel, por outro lado, a maior taxa de compressão é vantajosa para o consumo energético, mas está associada a maiores emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado.

De acordo com Heywood (1988), os MCIs operam com base nos ciclos Otto e Diesel, os quais definem a eficiência teórica do motor, o ciclo Otto, característico dos motores a gasolina, apresenta eficiência limitada por perdas térmicas e mecânicas, já o ciclo Diesel, com uma taxa de compressão mais elevada, é mais eficiente, porém mais poluente.

O desenvolvimento tecnológico dos MCIs tem buscado reduzir emissões e melhorar a eficiência térmica. Tecnologias como injeção direta, turboalimentação e sistemas de controle eletrônico são mencionadas por Heywood (1988) como fundamentais para alcançar esses objetivos. Além disso, o uso de combustíveis alternativos, como etanol e biodiesel, contribui para a mitigação do impacto ambiental (BRUNETTI, 2016).

Conforme Heywood (1988), as regulamentações ambientais, como o Proconve (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) no Brasil, têm impulsionado a adoção de tecnologias de pós-tratamento de emissões, incluindo catalisadores de três vias e filtros de partículas, como estratégias essenciais para atender aos limites de emissões globais.

De acordo com Brunetti (2016), o ciclo Otto é composto por quatro tempos distintos que desempenham papéis específicos na conversão de energia, conforme mostra a Figura 2.

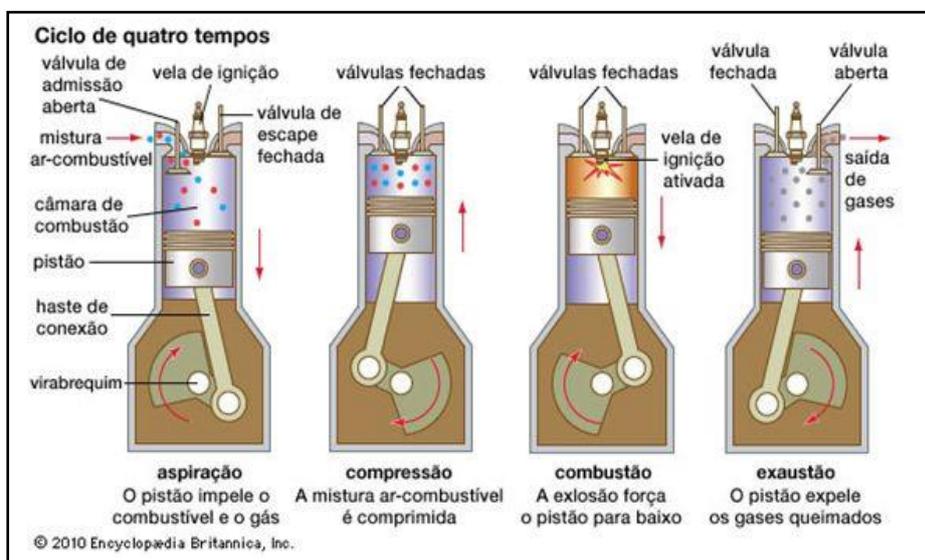


Figura 2: Ciclo de 4 tempos em um motor de combustão de ignição por centelha
Fonte: Alugagera (2017).

De acordo com a Figura 2, um ciclo de quatro tempos completo demanda duas voltas do virabrequim do motor, perfazendo um total de 720 graus de giro. Em tese, cada uma das fases deveria durar 180 graus metade de uma volta. Na prática, os projetistas, engenheiros de teste e preparadores tentam maximizar as fases de admissão e combustão chamadas “fases de potência” no jargão automotivo e reduzir as de compressão e escape.

Brunelli (2009) descreve que o primeiro tempo de um motor de ignição por centelha ou por compressão é a aspiração, momento em que a válvula de admissão permanece aberta, enquanto a válvula de escape fica fechada, o êmbolo se movimenta para baixo, sem que ocorra combustão, aumentando o volume do cilindro e permitindo a entrada do fluido de trabalho através da abertura da válvula de admissão.

De acordo com Brunelli (2009), o segundo tempo, denominado compressão, ocorre com ambas as válvulas (admissão e escapamento) fechadas, enquanto o êmbolo se desloca para cima, esse movimento reduz o volume do cilindro e comprime o fluido de trabalho. A taxa de compressão pode variar entre 7 e 20, dependendo do tipo de motor e do combustível utilizado.

No terceiro tempo, denominado combustão (trabalho), Brunelli (2009) explica que ambas as válvulas permanecem fechadas, e o êmbolo se move para baixo devido à queima da mistura, a ignição do fluido comprimido ocorre por meio da centelha da vela em motores do ciclo Otto ou pela injeção do combustível e autoignição nos motores do ciclo Diesel. O autor também explica que esse processo gera um aumento significativo da temperatura e da pressão dentro do cilindro, fazendo com que os gases resultantes empurrem o êmbolo para baixo, transmitindo energia mecânica ao virabrequim por meio da biela.

Por fim, segundo Brunelli (2009), o quarto tempo, chamado exaustão, acontece quando a válvula de escape se abre e a de admissão permanece fechada, o êmbolo se move para cima, reduzindo o volume do cilindro e expulsando os gases resultantes da combustão através da abertura da válvula de escapamento, na prática, há uma sobreposição na abertura das válvulas, o que favorece o fluxo dos gases e contribui para um melhor enchimento e esvaziamento do cilindro.

2.1.1 MCI de Ignição Por Compressão

De acordo com Heywood (1988), a combustão nos motores de ignição por compressão é um processo complexo, pois ocorre em um meio tridimensional, transiente e heterogêneo, composto pela mistura ar-combustível, resultando em um ambiente altamente turbulento. Ainda segundo Heywood (1988), o funcionamento do motor de combustão interna está diretamente

relacionado ao processo de combustão e à quantidade de combustível injetada, fatores que influenciam tanto o desempenho quanto as emissões do motor.

Serrano (2012) fala que a invenção dos motores de ignição por compressão ocorreu, entre outros fatores, em função das propriedades do combustível utilizado, que desempenha um papel fundamental no funcionamento e na eficiência do motor. Como destacado por Serrano (2012), o desempenho desses motores é impactado pelas características das moléculas do combustível, como tamanho e grau de saturação, que variam conforme a matéria-prima utilizada na sua produção.

Ainda segundo Serrano (2012), a combustão nos motores de ignição por compressão ocorre, geralmente, em três fases. A primeira fase envolve a injeção de gotas de combustível, que evaporam e se misturam ao ar até atingirem a ignição, processo influenciado pelo número de cetano e pela temperatura de autoignição do combustível. A segunda fase corresponde à combustão da pré-mistura e à continuidade da injeção do restante do combustível. Nessa etapa, a combustão se torna mais intensa e rápida, resultando em um aumento significativo de pressão e liberação de energia. Já a terceira fase, conhecida como combustão difusa, ocorre de maneira mais controlada, dependendo da vazão do combustível injetado. Nessa etapa, a presença da chama, juntamente com a alta pressão e temperatura, favorece a reação do combustível com o ar. A representação dos tempos do motor no ciclo Diesel pode ser observada na Figura 3.

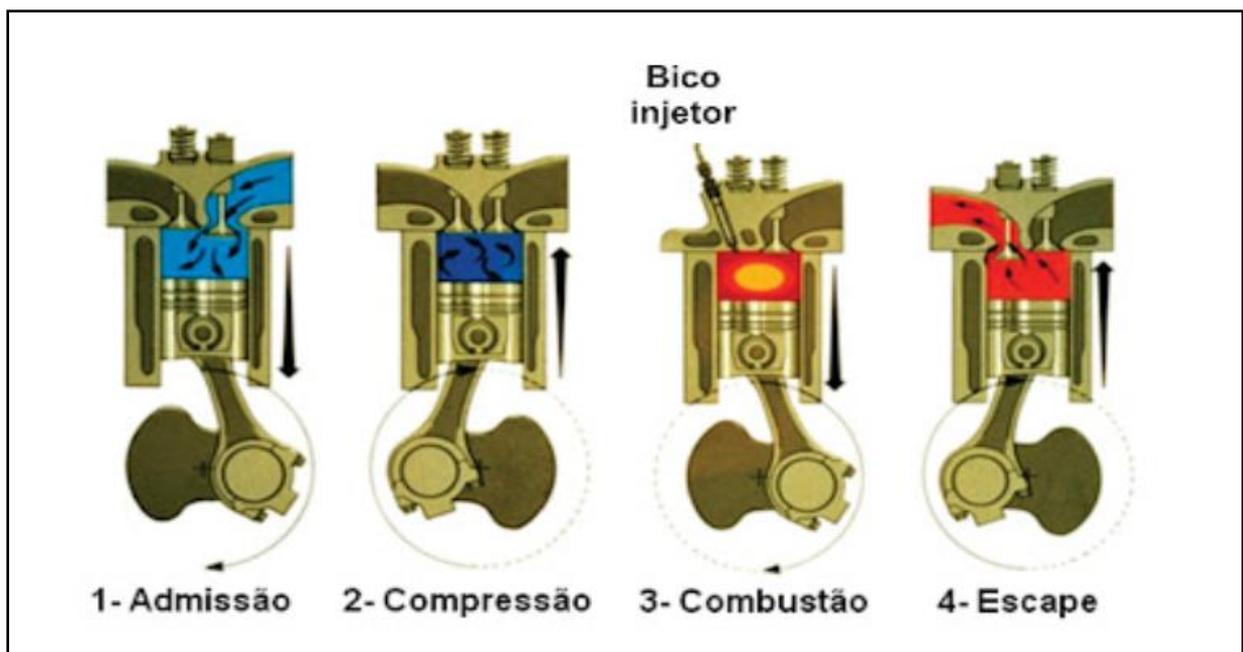


Figura 3: Funcionamento do motor do ciclo Diesel.
Fonte: Máquinas e motores na pesca (2023).

De acordo com a Figura 3, o motor do ciclo Diesel opera em quatro tempos distintos, sendo apenas um deles responsável pela geração de trabalho mecânico. O primeiro tempo inicia-se com o deslocamento do pistão do Ponto Morto Superior (P.M.S.) para o Ponto Morto Inferior (P.M.I.), permitindo a entrada do ar atmosférico filtrado devido à abertura da válvula de admissão. Durante esse processo, a árvore de manivelas realiza um giro de 180° (meia volta).

Na segunda etapa, o pistão se move do P.M.I. para o P.M.S. com ambas as válvulas (admissão e escape) fechadas. Esse movimento comprime o ar dentro da câmara de combustão, elevando sua temperatura. Novamente, a árvore de manivelas completa mais 180° .

Pouco antes do pistão atingir o P.M.S., ocorre a injeção pulverizada do óleo diesel. Esse combustível, ao se misturar com o oxigênio presente no ar comprimido, dá início à combustão espontânea devido à alta temperatura, gerando uma expansão dos gases que empurra o pistão para baixo, promovendo a realização de trabalho. Esse é o único tempo em que há conversão da energia química do combustível em energia mecânica. A árvore de manivelas completa mais 180° . No último tempo, o pistão retorna do P.M.I. ao P.M.S. enquanto a válvula de escape permanece aberta, permitindo a expulsão dos gases resultantes da combustão. Esse movimento finaliza o ciclo, e a árvore de manivelas realiza mais uma rotação de 180° .

Ainda segundo Máquinas e motores na pesca (2023), dos quatro tempos do ciclo Diesel, apenas o terceiro “combustão” é responsável por gerar trabalho útil, sendo denominado “tempo motor” ou “tempo vivo”. Os demais tempos “admissão, compressão e escape” são considerados “tempos mortos”, pois não contribuem diretamente para a produção de energia mecânica.

Brunetti (2018) descreve que o ciclo Diesel apresenta diferenças fundamentais em relação ao ciclo Otto, especialmente no que diz respeito ao fornecimento de calor ao fluido ativo. Enquanto no ciclo Otto esse processo ocorre de forma isocórica, no ciclo Diesel ele é considerado isobárico.

Segundo Brunetti (2018), na prática, a característica de pressão constante só é observada em motores de funcionamento muito lento. Dessa forma, os diagramas reais dos ciclos Otto e Diesel possuem formatos semelhantes. Essa diferença impacta diretamente a eficiência térmica e o comportamento do motor, conforme a Figura 4.

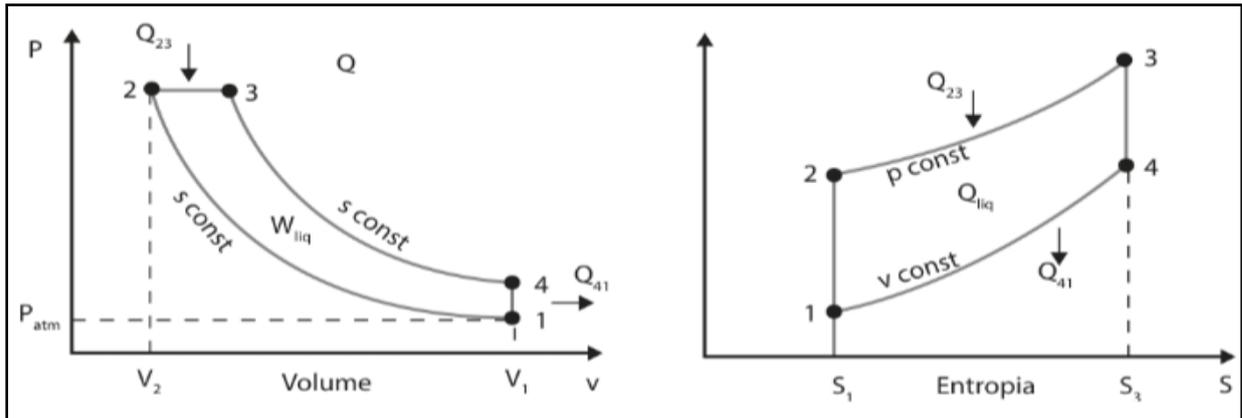


Figura 4: Diagramas P-V e T-S do ciclo Diesel.
Fonte: Brunetti (2018).

De acordo com Brunetti (2018), os diagramas pressão-volume (P-V) e temperatura-entropia (T-S) do ciclo Diesel são representações gráficas essenciais para compreender o funcionamento desse tipo de motor. No gráfico P-V, a área interna aos quatro processos corresponde ao trabalho líquido (W_c) e pode ser obtida por meio da equação (1).

$$Q_{23} - Q_{41} = W_c \quad (1)$$

- Q_{23} – Calor adicionado ao sistema no processo 2→3 (kJ).
- Q_{41} – Calor rejeitado pelo sistema no processo 4→1 (kJ).
- W_c – Trabalho líquido do ciclo (kJ).

A Primeira Lei da Termodinâmica, aplicada a motores, estabelece a conservação da energia, conforme equação (2).

$$Q_{23} - W_{23} = U_3 - U_2 \quad (2)$$

- W_{23} – Trabalho realizado no processo 2→3 (kJ).
- U_2, U_3 – Energia interna nos estados 3 e 2 (kJ).

Como a adição de calor ocorre a pressão constante, Brunetti (2018) explica que:

$$W_{23} = \int_2^3 p * dV = p * (V_3 - V_2) \quad (3)$$

- p – Pressão do gás (kPa).
- V_2, V_3 – Volume nos estados 3 e 2 (m^3).

Ainda conforme Brunetti (2018), para um gás perfeito, a variação de entalpia pode ser expressa conforme mostra a equação (4).

$$\Delta H = m * C_p * \Delta T \quad (4)$$

- ΔH – Variação de entalpia (kJ).
- m – Massa do fluido (kg).
- C_p – Calor específico a pressão constante (kJ/kg·K).
- ΔT – Variação de temperatura (K ou °C).

Dessa forma, a equação de calor adicionado (Q_{23}) e rejeitado (Q_{41}) no ciclo Diesel fica definida conforme mostra as equações (5) e (6), considerando C_p e C_v como calores específicos médios avaliados nas temperaturas de interesse.

$$Q_{23} = m * C_p * (T_3 - T_2) \quad (5)$$

$$Q_{41} = m * C_v * (T_4 - T_1) \quad (6)$$

A eficiência térmica do ciclo Diesel pode ser determinada a partir das equações anteriores. Segundo Brunetti (2018), a relação matemática que define essa eficiência é dada pela equação (7).

$$n_t = 1 - \frac{m * C_v * (T_4 - T_1)}{m * C_p * (T_3 - T_2)} \quad (7)$$

- η_t – Eficiência térmica do ciclo (adimensional ou %).
- m – Massa do fluido (kg).
- C_v – Calor específico a volume constante (kJ/kg·K).
- C_p – Calor específico a pressão constante (kJ/kg·K).
- T_1, T_2, T_3, T_4 – Temperaturas nos respectivos estados (K ou °C).

Brunetti (2018) enfatiza que a análise termodinâmica do ciclo Diesel demonstra que ele

opera com um fornecimento de calor isobárico e que sua eficiência térmica depende das condições de compressão e expansão do fluido de trabalho. O autor também estabelece que para determinar a potência disponível no eixo do motor, representada por (N_e), basta utilizar a equação (8), onde (n) é a rotação do motor e (T) é o torque do motor.

$$N_e = \frac{2\pi * T * n}{60 * 1000} \quad (8)$$

Bauer (2012) argumenta que o torque (T) é definido pela relação entre o raio de aplicação da força (L) e a força (F) aplicada ao pistão, como mostra a equação (9).

$$T = L * F \quad (9)$$

Segundo Castro (2014), a cilindrada de um motor (V_d) pode ser calculada através do diâmetro (D), curso do pistão (S) e a quantidade de cilindros (N), de acordo com a equação (10).

$$V_d = \frac{\pi * D^2 * S * N}{4} \quad (10)$$

Já o volume de um cilindro (cilindrada unitária – V_{du}) será a cilindrada dividido pelo número total de cilindros, conforme a equação (11).

$$V_{du} = V_d / N \quad (11)$$

Na perspectiva de Castro (2014), a relação de compressão (RC) é a quantidade de vezes que o volume será reduzido de PMI a PMS, de acordo com a equação (12).

$$RC = \frac{V_{du} + v_{cc}}{v_{cc}} \quad (12)$$

De acordo com Tukoff *apud* Leal (2022), pode-se obter a pressão média efetiva (pme), pela relação entre a variação do volume específico do gás e o trabalho líquido específico, como mostra a equação (13).

$$pme = \frac{W_{liq}}{v_1 - v_2} \quad (13)$$

Conforme Castro (2014), a potência indicada (P_i) pode ser calculada através da equação (14).

$$P_i = pme * \frac{\pi * D^2}{4} * S * N_{cil} * \frac{n}{60} * \frac{1}{x} \quad (14)$$

Em que: D é o diâmetro do cilindro, pme é a pressão média efetiva, S é o curso do pistão, n é a rotação do motor, x é o fator de tempos, e N_{cil} é o número de cilindros

2.2 Hidrogênio

Na visão de Grigoriadis e Silva (2022), o hidrogênio é considerado uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis em motores de combustão interna. O autor também relata que, a combustão resulta principalmente em vapor d'água, reduzindo significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o hidrogênio possui um elevado poder calorífico, o que pode melhorar a eficiência dos motores.

Damascena e Góes (2013) apontam que a produção de hidrogênio “*in situ*” por meio da eletrólise da água é uma alternativa viável para alimentar motores de combustão interna. O autor também afirma que esse método permite a geração de hidrogênio diretamente no veículo, eliminando a necessidade de armazenamento em alta pressão ou temperatura, o que pode aumentar a segurança e viabilidade do uso do hidrogênio como combustível.

Por outro lado, Picheli *et al* (2019) ressalta que, apesar das vantagens, o uso do hidrogênio em motores de combustão interna enfrenta desafios significativos. Para o mesmo autor, a produção de hidrogênio por eletrólise requer uma quantidade considerável de energia elétrica, o que pode comprometer a eficiência energética do sistema. Além disso, o armazenamento seguro do hidrogênio e a prevenção de combustão anômala são questões que precisam ser cuidadosamente abordadas.

Pereira *et al* (2015) investigaram o uso do hidrogênio como combustível para motores de combustão interna com o auxílio de uma célula de oxi-hidrogênio. Ainda segundo o mesmo autor, após a instalação da célula em um veículo com motor de 1 litro, observaram uma redução no consumo de combustível na ordem de 30%, além de um perceptível ganho de potência.

Grigoriadis e Silva (2022) concluem que, embora o hidrogênio apresente um grande potencial como combustível alternativo, sua implementação em larga escala depende do desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e seguras para sua produção, armazenamento e utilização em motores de combustão interna. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento são essenciais para superar os desafios atuais e viabilizar o uso do hidrogênio como uma fonte de energia limpa e sustentável.

Bernabe (2018) destaca que o hidrogênio possui diversas vantagens para aplicação energética, além de ser uma fonte sustentável, ele é facilmente convertido em eletricidade e calor, podendo atuar como complemento à energia elétrica ou mesmo como combustível. Notavelmente, o hidrogênio apresenta um poder calorífico superior a qualquer outro combustível conhecido, sendo aproximadamente três vezes maior que o da gasolina: 141,86 kJ/g para o hidrogênio, comparado a 47,5 kJ/g para a gasolina. A Tabela 2, mostra o poder calorífico dos combustíveis a 25°C e 1atm.

Tabela 2: Poder calorífico dos combustíveis.

Combustível	Poder Calorífico Superior (kJ/g)	Poder Calorífico Inferior (kJ/g)
Hidrogênio	141,86	119,93
Metano	55,53	50,02
Propano	50,36	45,6
Gasolina	47,5	44,5
Diesel	44,8	42,5
Metanol	19,96	18,05

Fonte: Adaptado de Bernabe (2018).

Bernabe (2018) observa que, nas condições normais de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e inflamável, com densidade aproximadamente 14 vezes menor que a do ar. Segundo o pesquisador, devido a essa baixa densidade, o armazenamento de hidrogênio na forma gasosa requer compressão a altas pressões. Ainda conforme sua análise, embora o hidrogênio esteja presente em quase todas as moléculas, ele não é encontrado em sua forma molecular livre na natureza, necessitando ser produzido a partir de compostos como a água ou hidrocarbonetos. Bernabe *apud National Institute of Standards and*

Technology (2018) afirma que o hidrogênio puro é seguro para armazenamento; no entanto, os riscos aumentam na presença de oxigênio, pois a mistura pode ser altamente explosiva, a energia mínima necessária para a ignição do hidrogênio, quando exposto ao ar, é de apenas 0,02 mJ.

2.3 Biodiesel

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2020), o biodiesel é um combustível renovável obtido, principalmente, por meio de um processo químico chamado transesterificação. Nesse processo, os triglicerídeos presentes em óleos vegetais ou gorduras animais reagem com um produto químico, dependendo da rota de produção, resultando na formação de dois produtos principais: ésteres e glicerol. Após passar por processos de purificação para atender às especificações de qualidade, os ésteres são comercializados como biodiesel, destinados especialmente a motores de ignição por compressão (ANP, 2020). Outro método possível para a produção de biodiesel é a esterificação.

Segundo a ANP (2020), a mistura do biodiesel ao diesel (de origem fóssil) no Brasil começou de forma experimental em 2004. Entre 2005 e 2007, foi comercializado voluntariamente com uma mistura de 2%. Segundo a ANP (2020), a obrigatoriedade foi estabelecida no artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, que introduziu o biodiesel na matriz energética brasileira. Em janeiro de 2008, tornou-se obrigatória a adição de 2% de biodiesel (B2) em todo o território nacional, sendo esse percentual gradualmente ampliado nos anos seguintes conforme o mercado amadurecia.

Em 2021, o percentual de biodiesel foi alterado diversas vezes. Em março, passou a ser de 13% (Resolução CNPE nº 16/2018), mas foi reduzido para 10% em maio (Resoluções CNPE nº 4 e 10/2021). Em setembro, subiu para 12% (Resolução CNPE nº 11/2021), mas foi novamente reduzido para 10% em novembro (Resoluções CNPE nº 14 e 25/2021 e 12/2022). De acordo com a ANP (2020), essas alterações refletiram ajustes nas condições do mercado e nas demandas de produção. Em abril de 2023, o percentual foi ampliado de 10% para 12% (Resolução CNPE nº 3/2023), e em março de 2024 subiu para 14% (Resolução CNPE nº 8/2023).

A ANP (2020) destaca que a Resolução CNPE nº 8/2023 prevê a elevação do percentual de biodiesel para 15% a partir de agosto de 2025. Essa progressão tem como objetivo ampliar a participação de combustíveis renováveis na matriz energética, reduzindo a dependência de fontes fósseis e contribuindo para metas ambientais.

ANP (2020) destaca que ao longo dos anos, a especificação do biodiesel tem sido aprimorada, o que tem garantido maior alinhamento da sua qualidade às condições do mercado nacional e harmonização com padrões internacionais. Segundo a ANP (2020), essas melhorias aumentaram a segurança, a previsibilidade e a confiança dos agentes econômicos, fortalecendo o mercado de biodiesel no Brasil e assegurando sua competitividade no cenário global.

De acordo com Vivas (2010), a Tabela 3 apresenta uma comparação entre algumas propriedades do óleo diesel e do biodiesel, destacando parâmetros essenciais para a compreensão do comportamento desses combustíveis na combustão. Assim, a Tabela 3 evidencia as diferenças fundamentais entre os dois combustíveis e reforça a importância de compreender como essas propriedades influenciam a combustão e a emissão de poluentes. Ainda segundo Vivas (2010), tais aspectos são essenciais para o desenvolvimento de estratégias que equilibrem eficiência energética e redução do impacto ambiental na utilização de biocombustíveis.

Tabela 3: Propriedades do óleo diesel e biodiesel.

Propriedade/Unidade	Diesel	Biodiesel	Referência
Poder calorífico inferior (kJ kg ⁻¹)	45000	39600	Kwanchareon et al. (2007)
Poder calorífico inferior (kJ kg ⁻¹)	46173	40606	Lin (2006)
Massa específica (kg l ⁻¹)	0,8354	0,8786	Kwanchareon et al. (2007)
Índice de cetanos	47,64	55,4	Kwanchareon et al. (2007)
	50,9	45,8	Lin (2006)
Ponto de fulgor (T _f) (°C)	69	122	Kwanchareon et al. (2007)
Ponto de fulgor (T _f) (°C)	65	129,1	Lin (2006) (de soja)

Fonte: Adaptado de Vivas (2010).

2.3.1 Biocombustível de 1ª geração

Silva *apud* Rosa (2007) afirma que o biodiesel, designado como biocombustível de 1ª geração, é produzido a partir de óleos vegetais ou animais (misturas de triglicerídeos), assim como de óleos alimentares usados. Neste contexto, as principais culturas energéticas incluem girassol, soja, colza e palma. Além disso, outras culturas como o cardo ou matérias-primas alternativas, como microalgas (nomeadamente clorofitas e diatomáceas), também podem ser utilizadas.

Silva *apud* Thuijl *et al.* (2003) destaca que, embora os óleos vegetais na forma pura possam ser empregados diretamente em motores de combustão interna por compressão, suas

propriedades apresentam menos vantagens para essa aplicação. Na Figura 5, estão indicados alguns parâmetros relevantes dos óleos vegetais e do gasóleo de origem fóssil (óleo diesel). Em que VC é a viscosidade cinemática; IC o índice de cetano; PI o ponto de inflamação; e PCS o poder calorífico superior.

Gasóleo/Óleo	VC (310,95 K, mm ² /s)	IC	PI (K)	PCS (MJ/Kg)
Gasóleo de origem fóssil	2,7	47,0	325,15	45,3
Colza	37,0	37,6	519,15	39,7
Girassol	37,1	37,1	547,15	39,6
Soja	28,5 - 32,6	37,9	527,15	39,6

Figura 5: Comparação de parâmetros relevantes (valores médios) em óleos vegetais e gasóleo de origem fóssil. Fonte: Silva *apud* adaptado de Knothe et al., 2005

Silva (2009) afirma que, para obter um combustível com características semelhantes às do gasóleo de origem fóssil (óleo diesel), os óleos vegetais puros extraídos de culturas energéticas ou gorduras animais são convertidos em biodiesel (ésteres de ácidos gordos). Esse processo resulta em um biocombustível com um índice de cetano superior e menor viscosidade.

2.3.2 Biocombustível de 2ª geração

Lofrano e Oliveira (2015) destacam que os biocombustíveis de segunda geração surgem como uma alternativa sustentável aos de primeira geração, pois utilizam matérias-primas não alimentícias, como resíduos agrícolas, biomassa lignocelulósica e óleos não comestíveis. Essa abordagem reduz a competição com a produção de alimentos e diminui impactos ambientais associados ao uso da terra e ao desmatamento.

Diop e Blanco (2013) apontam que a principal vantagem dos biocombustíveis de segunda geração é a utilização de fontes renováveis que não afetam a segurança alimentar. Matérias-primas como bagaço de cana, restos de madeira e resíduos urbanos permitem um aproveitamento mais eficiente da biomassa, contribuindo para um modelo energético mais sustentável.

Segundo Diop e Blanco (2013), apesar dos benefícios ambientais, a produção de biocombustíveis de segunda geração enfrenta desafios tecnológicos e econômicos. Ainda de

acordo com Diop e Blanco (2013), o alto custo dos processos de conversão e a necessidade de melhorias na cadeia de suprimentos dificultam suas opções comerciais, embora apresentem grande potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e minimizar o impacto com culturas alimentares, ainda assim alcançar avanços tecnológicos e incentivos financeiros para se tornarem uma alternativa viável no mercado energético global.

Lofrano e Oliveira *apud* Gadonneix (2010) enfatizam a importância de políticas governamentais e incentivos fiscais para viabilizar a produção em larga escala, em países da União Europeia e da América do Norte, programas de apoio têm sido implementados para fomentar o desenvolvimento dessas tecnologias e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

Segundo Smith (2013), apesar do potencial dos biocombustíveis de segunda geração para reduzir emissões de gases de efeito estufa e minimizar a competição com culturas alimentares, sua produção global ainda é insignificante devido aos altos custos de conversão. Ainda na visão de Smith (2013), além disso, a complexidade tecnológica e os desafios logísticos dificultam suas previsões econômicas, especialmente em países em desenvolvimento. A implementação comercial dessas tecnologias ainda depende de avanços em pesquisa e desenvolvimento para reduzir custos e tornar os processos mais eficientes.

2.4 Uso de Misturas em MCI

Kouketsu (2023) investigou os efeitos da adição de hidrogênio à mistura ar/combustível em motores ciclo Diesel. Suas simulações numéricas indicaram que a introdução de hidrogênio, aliada à redução do diesel injetado, pode melhorar a eficiência do motor, diminuir o consumo de combustível fóssil e reduzir as emissões de poluentes. No entanto, o autor ressalta que, apesar dos benefícios, é essencial considerar os desafios associados ao armazenamento e manuseio seguro do hidrogênio. Além disso, a proporção ideal na mistura deve ser cuidadosamente calibrada para cada tipo de motor, garantindo eficiência sem comprometer a durabilidade e a segurança do sistema.

Zanutto (2020) enfatiza a importância de modelos precisos na simulação da formação de misturas dentro dos cilindros dos motores. A modelagem detalhada da evaporação de gotas de combustíveis permite otimizar o desempenho do motor e minimizar a emissão de poluentes, especialmente quando se utilizam misturas de combustíveis com diferentes propriedades físico-químicas.

Amaral *apud* Dincer e Acar (2014), destaca que o hidrogênio é um gás altamente reativo e, quimicamente, geralmente se encontra combinado a outros elementos, como oxigênio e carbono, além de estar presente em compostos orgânicos. Conforme Amaral (2014), sua produção ocorre pela quebra de ligações covalentes da água ou de moléculas orgânicas, como álcoois ou hidrocarbonetos.

Amaral, *apud* Verhelst (2014), aponta que a utilização de hidrogênio em motores de combustão interna se justifica principalmente pela redução de emissões de óxidos de carbono e enxofre, tornando-o uma alternativa promissora para diminuir o impacto ambiental. Ainda na visão do autor, outra vantagem mencionada pelo autor é a flexibilidade no uso de combustíveis em motores modernos, desde que a unidade de controle eletrônico esteja adaptada, ampliando assim as possibilidades de aplicação do hidrogênio como fonte de energia.

Amaral, *apud* Verhelst (2014), observa que muitos questionamentos sobre o uso do hidrogênio estão relacionados às células a combustível, cujas matérias-primas de alto valor elevam significativamente os custos, tornando necessário considerar alternativas economicamente mais viáveis.

Amaral, *apud* Wang et al. (2016), destaca que o uso do hidrogênio em misturas gasosas provenientes de processos de reforma catalítica embarcada de etanol pode ser uma solução viável. Ainda de acordo com Amaral, *apud* Wang et al. (2016), no entanto, ainda existem desafios a serem superados, como sua baixa densidade, que exige armazenamento sob alta pressão, e sua elevada difusividade, que pode reduzir a eficiência volumétrica do motor ao substituir o ar atmosférico admitido, além do alto custo de obtenção e comercialização.

2.5 Análise Técnica (*Software* Diesel RK)

O Diesel RK é um *software* de modelagem e simulação aberto de simulação com foco em motores de combustão interna, que oferece uma ampla gama de configurações para essas máquinas térmicas, tendo aplicação tanto na indústria quanto na área acadêmica (DIESEL-RK, 2010).

O *software* DIESEL-RK apresenta-se como uma ferramenta avançada para a simulação e otimização de motores de combustão interna, com ênfase em precisão matemática e adaptabilidade. De acordo com o DIESEL-RK (2025), seu desenvolvimento teve início em 1981-82 no Departamento de Motores de Combustão Interna da *Bauman Moscow State Technical University*, sendo concebido inicialmente para pesquisas de otimização. Desde então, o *software*

foi continuamente aprimorado em colaboração com fabricantes de motores, o que garantiu sua aplicação prática em dezenas de motores de diferentes tipos e finalidades.

A principal funcionalidade do DIESEL-RK está na simulação termodinâmica de motores de dois e quatro tempos. Segundo o DIESEL-RK (2025), a ferramenta é capaz de modelar motores Diesel de injeção direta (DI), motores a gasolina de ignição por centelha (SI), motores bicombustíveis e até motores de dois tempos, abrangendo diferentes combustíveis, como biocombustíveis, gás de síntese e gás natural. Essa versatilidade permite que o *software* atenda tanto à previsão de desempenho do motor quanto a análise de emissões e combustão.

O DIESEL-RK (2025) se diferencia ao incorporar o Modelo RK, que utiliza um sistema multizona para simular a combustão e a formação de mistura no motor Diesel. Este modelo permite análises detalhadas de pulverização de combustível, com recursos avançados, como visualização em 3D e ferramentas para otimização de parâmetros como formato do pistão, perfis de redemoinho e estratégias de injeção múltipla. Essa abordagem possibilita uma análise mais precisa de fenômenos complexos, como interação entre jatos de combustível e superfícies internas do cilindro.

Além disso, o *software* destaca-se pela integração de funcionalidades voltadas para a análise de emissões. Conforme o DIESEL-RK (2025), o programa utiliza um mecanismo cinético detalhado para prever a formação de NO_x, fuligem e outros poluentes em condições específicas, como em motores com EGR (recirculação de gases de escapamento) elevado. Essa capacidade supera métodos convencionais, como o mecanismo de Zeldovich, que apresenta limitações em cenários de alta recirculação ou múltiplas injeções.

Outro ponto forte é a flexibilidade do DIESEL-RK para simular diferentes configurações de motor e combustíveis. Segundo o DIESEL-RK (2025), o *software* oferece suporte para otimização do formato do pistão e dos parâmetros de injeção, como o número, o diâmetro e a orientação dos injetores, além de estratégias avançadas para injeção múltipla. Isso permite que engenheiros ajustem motores para obter melhor eficiência, reduzindo simultaneamente consumo de combustível e emissões.

O programa também é amplamente utilizado para aplicações específicas, como previsão de consumo de combustível, análise de formação de mistura em motores bicombustíveis, otimização de válvulas variáveis (VVA) e conversão de motores Diesel para motores a gás. De acordo com o DIESEL-RK (2025), a ferramenta coopera com *softwares* como *Simulink* e *IOSO NM*, permitindo sua integração com outras plataformas de modelagem e controle.

Embora apresente funcionalidades semelhantes a *softwares* como WAVE, GT-Power e BOOST, o DIESEL-RK (2025) se destaca por suas capacidades únicas de modelagem, como a simulação de injeção de água e a consideração de efeitos térmicos locais, como a temperatura das paredes no impacto dos jatos de combustível. Essas características avançadas reforçam seu papel como uma solução poderosa para o desenvolvimento e a otimização de motores modernos, atendendo à demanda crescente por eficiência energética e redução de emissões. O *software* foi utilizado em sua versão *student*, disponibilizada gratuitamente no site oficial do Diesel-RK.

2.6 Análise Experimental

Segundo Neto, Scarminio e Bruns (2010), a análise experimental é um elemento fundamental na investigação científica e tecnológica, permitindo a obtenção de informações confiáveis sobre os sistemas estudados. O sucesso de um experimento está diretamente relacionado ao planejamento adequado das variáveis e ao uso de métodos estatísticos que garantam a precisão e a reprodutibilidade dos resultados. Um dos principais desafios no planejamento de experimentos é definir quais fatores experimentais devem ser controlados para assegurar a qualidade dos dados coletados e minimizar a incerteza associada às medições (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

De acordo com Montgomery (2012), o uso de métodos estatísticos no planejamento de experimentos possibilita a extração do máximo de informação com o menor número possível de ensaios, tornando a pesquisa mais eficiente e econômica. Um planejamento bem estruturado não apenas reduz a variabilidade indesejada, mas também permite a identificação de interações entre fatores que poderiam passar despercebidos em abordagens experimentais menos sistemáticas (MONTGOMERY, 2012). O mesmo autor descreve que, a aplicação de delineamentos experimentais, como os delineamentos fatoriais e as superfícies de resposta, contribui para uma análise mais aprofundada das relações entre variáveis e para a otimização dos processos estudados.

De acordo com Neto, Scarminio e Bruns (2010), além do planejamento adequado, a análise dos dados experimentais deve seguir princípios rigorosos para garantir interpretações confiáveis. A simples coleta de dados não é suficiente para gerar conhecimento útil; é necessário empregar técnicas de análise estatística para identificar padrões e correlações significativas (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). Métodos como a análise de variância (ANOVA),

regressão múltipla e técnicas multivariadas são amplamente utilizados para avaliar a influência de diferentes fatores sobre as respostas do sistema investigado.

Por fim, a validação dos resultados experimentais é um passo essencial para garantir sua aplicabilidade. A repetibilidade dos experimentos e a análise crítica dos dados obtidos são fundamentais para estabelecer a robustez das conclusões (MONTGOMERY, 2012). A integração de ferramentas estatísticas com o conhecimento técnico do problema estudado permite não apenas compreender melhor o fenômeno em questão, mas também propor melhorias e otimizações baseadas em evidências experimentais.

2.7 Considerações Finais

As referências teóricas fundamentais para a pesquisa são desenvolvidas neste capítulo, descrevendo os conceitos de motores de combustão interna de ignição por compressão, hidrogênio, biodiesel, uso misturas em MCI, avaliação técnica do *software* Diesel-RK, análise experimental, os quais são essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são demonstradas as características do desenvolvimento da pesquisa acerca da análise de desempenho de um motor utilizando uma mistura de hidrogênio e biodiesel como combustível em um motor de combustão interna por compressão. É apresentada a natureza da pesquisa, o tipo, as variáveis e indicadores coletados, o instrumento de captação e a tabulação dos dados.

3.1 Tipo de pesquisa

A pesquisa, segundo o Dicionário Aurélio (2015), consiste na busca diligente por informações, envolvendo investigação e inquirição detalhada. A pesquisa tem como finalidade a descoberta de novos conhecimentos, a exploração de temas e a coleta de elementos para estudo. Dessa forma, o presente trabalho fundamenta-se na pesquisa como um processo metodológico essencial, pautado na busca e análise de informações para a construção do conhecimento científico.

Segundo Minayo (2003), a pesquisa pode ser realizada de duas formas: qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa baseia-se na interpretação e trabalha com um conjunto de significados, motivos, valores, crenças e atitudes, englobando uma relação mais subjetiva dos processos e fenômenos que não podem ser sintetizados em operações e variáveis, sendo difíceis de descrever numericamente.

Já a pesquisa onde se utilizam métodos estatísticos, análises numéricas e testes para obter resultados quantificáveis é conhecida como pesquisa quantitativa (Silva, 2004). De acordo com Lakatos e Marconi (2006), esse tipo de investigação é mais indicado quando há a possibilidade de relacionar o fenômeno estudado a dados quantificados de maneira objetiva e sistemática.

Gil (2019) classifica o objetivo de uma pesquisa como exploratório quando se busca esclarecer, desenvolver e modificar conceitos e ideias, utilizando a coleta de dados por meio de levantamento bibliográfico, documental e estudos de caso. Ainda de acordo com Gil (2019), a pesquisa pode também ter um caráter explicativo, onde se identificam fatores que contribuem para a ocorrência de determinados fenômenos, permitindo uma compreensão mais aprofundada sobre eles.

Lakatos e Marconi (2006) apontam que a pesquisa bibliográfica consiste em um levantamento de dados relevantes ao tema, elaborados a partir da síntese de outros trabalhos acadêmicos. Fonseca (2002) define a pesquisa documental como aquela elaborada a partir de

diversas fontes, sem uma abordagem analítica. Conforme mencionado por Lakatos e Marconi (2006), a pesquisa-ação é estruturada com base em dados empíricos, buscando uma solução para um problema específico. Por fim, a pesquisa experimental, segundo Gil (2002), consiste em determinar um objeto de estudo, definir formas de controle e observar os efeitos das variáveis selecionadas sobre esse objeto.

Este trabalho adota uma abordagem híbrida, combinando métodos quantitativos e qualitativos para avaliar o desempenho de um motor de combustão interna por operação com uma mistura de hidrogênio e biodiesel como combustível. A abordagem quantitativa se baseia na utilização de dados numéricos, cálculos e análise estatística para examinar variáveis como consumo, torque, potência e emissão de emissões. Já uma abordagem qualitativa fundamenta a interpretação de significados, motivos, valores, opiniões e atitudes, permitindo uma análise mais subjetiva dos processos e tendências que não podem ser facilmente representadas por operações matemáticas ou variáveis numéricas.

Quanto ao objetivo, a pesquisa é definida como descritiva e experimental, pois busca analisar e observar o funcionamento do motor por meio de testes e cálculos específicos. Além disso, o estudo inclui uma pesquisa bibliográfica baseada em trabalhos acadêmicos já realizados sobre o tema, proporcionando um embasamento teórico.

3.2 Materiais e Métodos

É realizada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de nortear a análise do desempenho de motores a combustão interna utilizando uma mistura de hidrogênio e biodiesel como combustível. O estudo aborda as características do hidrogênio e do biodiesel, suas propriedades físico-químicas, além dos desafios técnicos relacionados ao seu armazenamento, injeção e uso em motores de combustão interna. São discutidas as vantagens e limitações dessa mistura de combustíveis, como a redução das emissões de poluentes, a melhoria da eficiência energética, e os cuidados especiais com o armazenamento do hidrogênio devido à sua baixa massa específica e elevada difusividade.

A pesquisa inclui a revisão de tecnologias alternativas que utilizam o hidrogênio misturado ao biodiesel, explorando as possibilidades de otimização do desempenho do motor e os impactos ambientais dessa combinação de combustíveis. Para uma análise mais precisa, são consultados artigos e publicações científicas de fontes acadêmicas reconhecidas, como Google acadêmico e livros da biblioteca digital da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), com foco em estudos que abordam o uso do hidrogênio e do biodiesel em motores ciclo Diesel.

Além disso, a pesquisa envolve a análise das características do hidrogênio e do biodiesel, bem como das especificações técnicas do motor utilizado nos estudos, com base nas informações fornecidas pelos fabricantes. Essa abordagem permite a construção de um embasamento teórico robusto para a análise dos benefícios e limitações do uso de hidrogênio e biodiesel como combustível alternativo, contribuindo para a busca de soluções sustentáveis e eficientes no setor automotivo.

A avaliação do desempenho do motor é conduzida em duas etapas. A primeira etapa envolve uma análise numérica, na qual os dados do motor são coletados e as simulações são realizadas utilizando o *software* Diesel RK. Nessa fase, são efetuados cálculos considerando diferentes proporções de hidrogênio e biodiesel, iniciando com biodiesel puro e aumentando a concentração de hidrogênio em incrementos de 10% até atingir 30% na mistura. O objetivo dessa análise inicial é aplicar modelos teóricos para estimar parâmetros como torque, potência, consumo de específico e emissões de poluentes.

O sequenciamento da metodologia adotada para este trabalho está representado de forma objetiva, permitindo uma visualização sistemática das etapas desenvolvidas ao longo do processo, conforme a Figura 6.

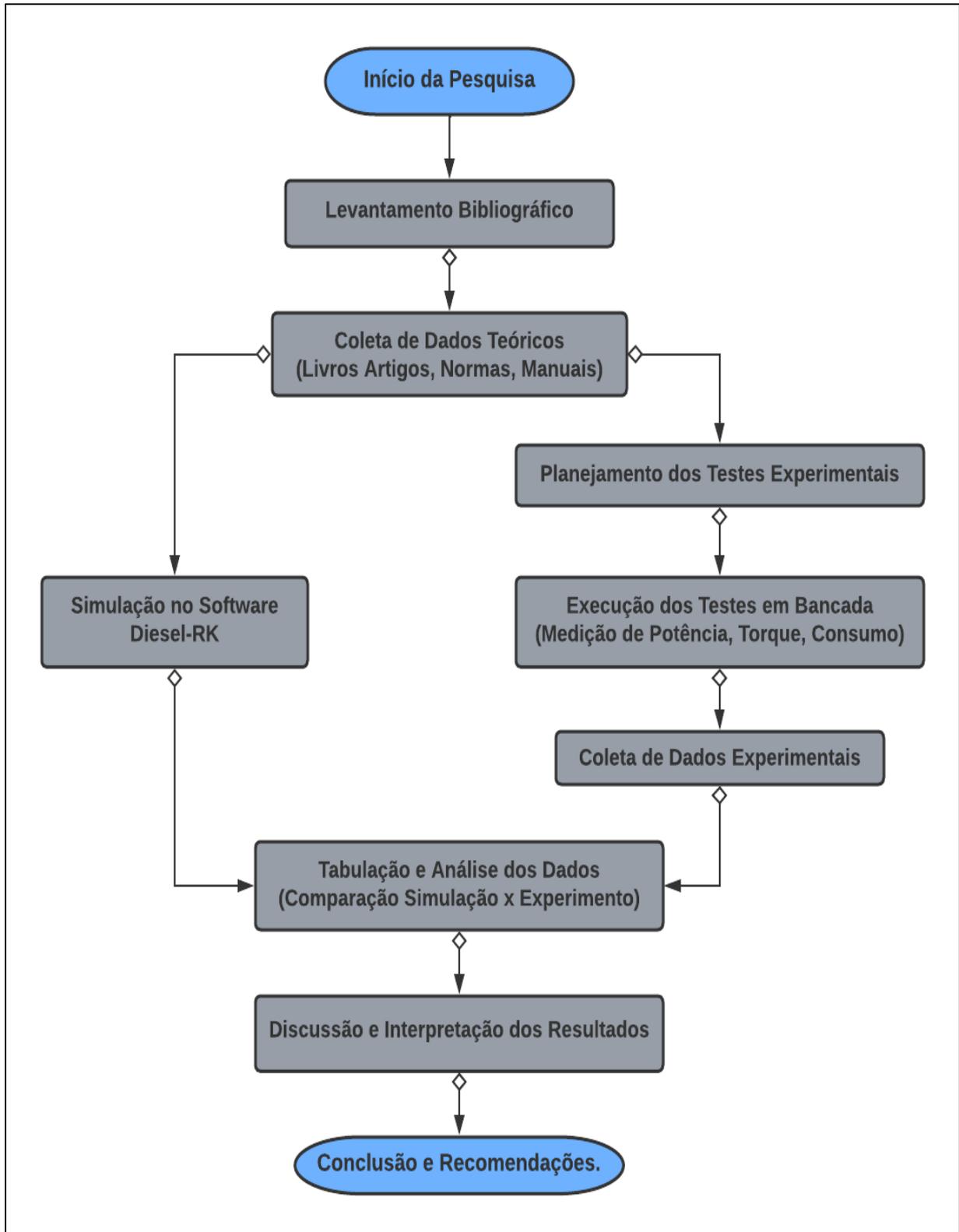


Figura 6: Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na etapa de simulação com o *software* Diesel-RK, a Figura 7a apresenta as opções de configuração dos tempos do motor e dos tipos de ciclos termodinâmicos disponíveis para os diferentes combustíveis. A seguir, a Figura 7b exibe os modelos de disposição dos pistões que podem ser selecionados conforme o projeto do motor. Já a Figura 7c ilustra a etapa de definição das características geométricas do cilindro, permitindo ao usuário inserir parâmetros específicos como diâmetro e curso do pistão. Na Figura 7d, observa-se a configuração das condições ambientais de operação, como a pressão atmosférica e a temperatura ambiente. Por fim, a Figura 7e mostra a interface onde é possível ajustar o número de válvulas ativas no motor, completando o processo de parametrização básica para a simulação.

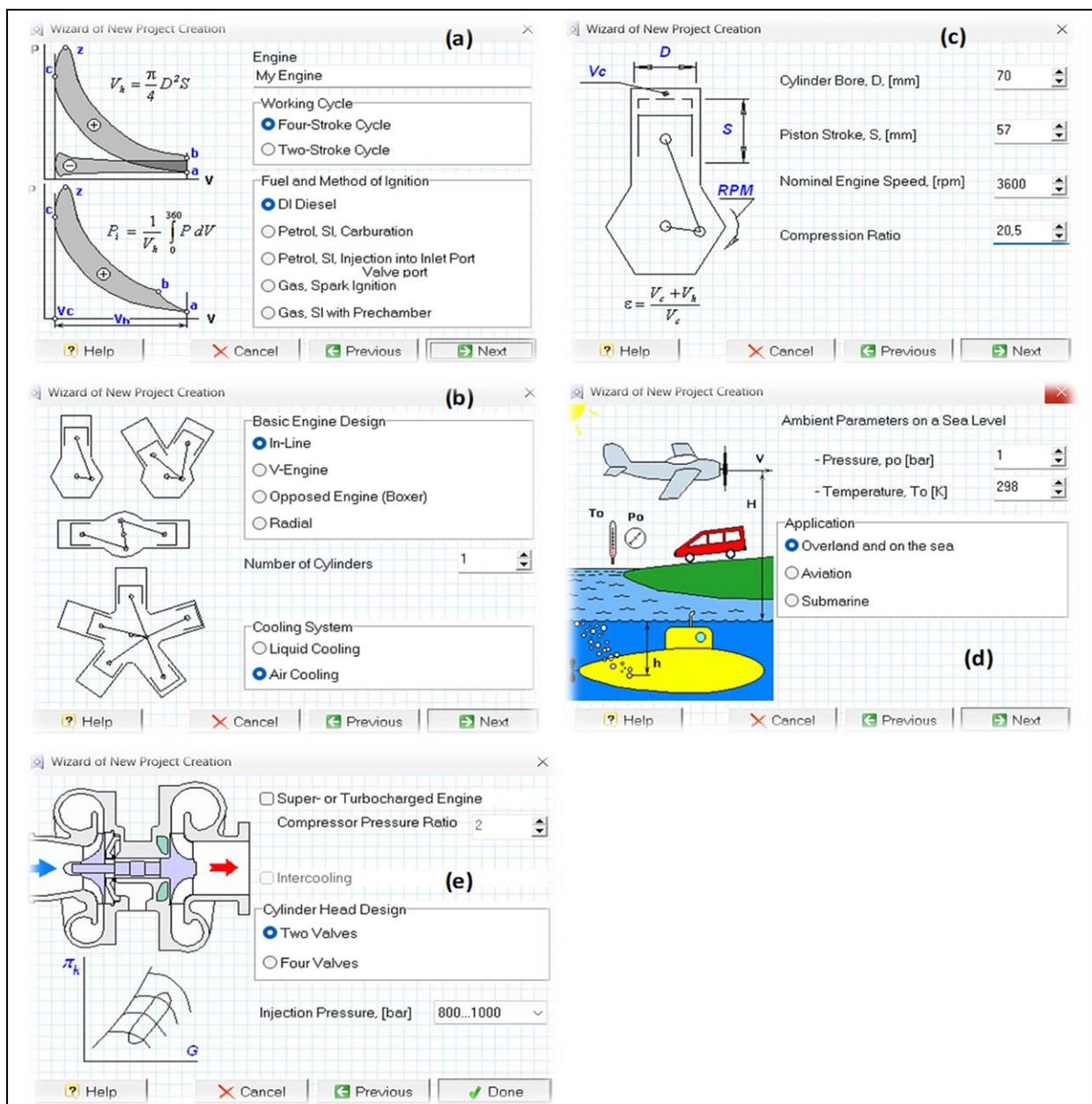


Figura 7: Telas de configuração do Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A progressão do desenvolvimento da simulação pode ser observada na Figura 8.

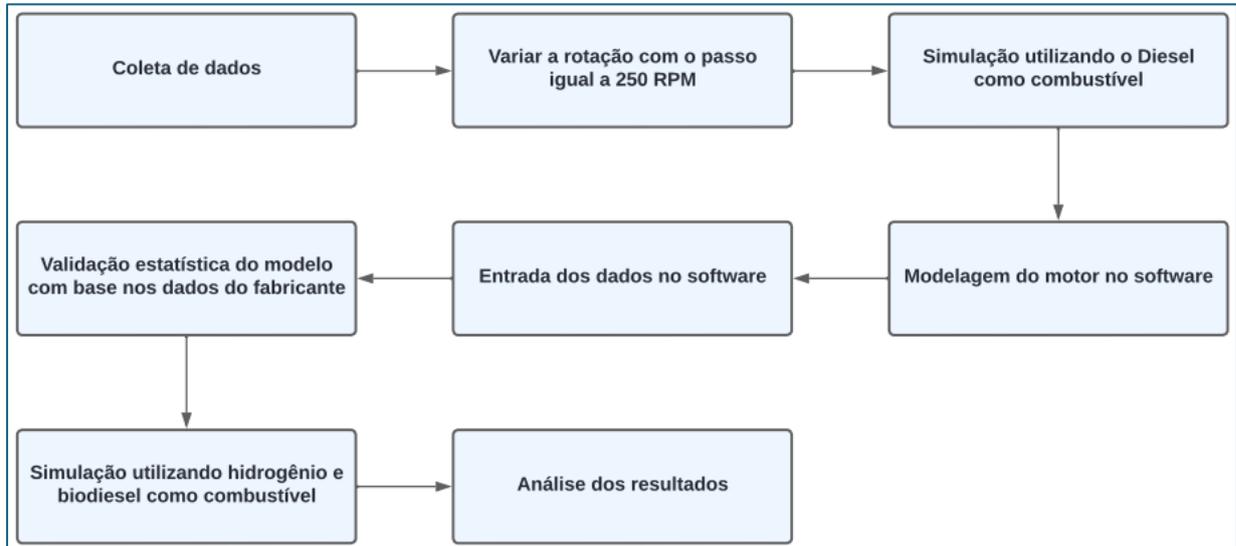


Figura 8: Fluxograma dos procedimentos da simulação no software Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Conclui-se a metodologia com a utilização de ferramentas de análise de dados, como o *Microsoft Excel*. Os resultados obtidos da simulação do motor de combustão interna são analisados e comparados com os dados do fabricante, que fornecem valores reais de motores operando com o combustível original (Diesel), com o objetivo de validar o uso do software.

Utilizando como parâmetro de validação estatística do modelo, é calculado o erro percentual do torque e da potência do motor nas rotações simuladas, a partir das equações (15) e (16).

$$Erro_{Torque} = \frac{Torque\ simulado - Torque\ real}{Torque\ simulado} \times 100\% \quad (15)$$

$$Erro_{Potência} = \frac{Potência\ simulada - Potência\ real}{Potência\ simulada} \times 100\% \quad (16)$$

A segunda etapa da análise será realizada em laboratório e consistirá em um procedimento experimental.

Os testes são conduzidos em um dinamômetro de bancada instalado no laboratório da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), onde os testes foram realizados utilizando apenas o diesel como combustível. O dinamômetro permite a medição dos parâmetros de desempenho do motor, como potência e torque, sob diferentes condições operacionais. Além disso, sensores e instrumentos de monitoramento são utilizados para avaliar a eficiência térmica do motor.

Ao final da análise experimental, os dados quantitativos obtidos possibilitarão a comparação entre os resultados das simulações e os dados fornecidos pelo fabricante.

3.3 Variáveis e Indicadores

De acordo com Lakatos e Marconi (2006), uma variável é um conceito operacional, classificação ou medida que possui valores ou propriedades. Sua importância para a pesquisa é tal que, permitem o teste de hipóteses que relacionam diferentes aspectos do mundo natural e social.

Walliman (2015) destaca o conceito de indicadores, definidos como medidas ou variáveis utilizadas para avaliar um fenômeno, seja de maneira quantitativa ou qualitativa. A escolha de um indicador específico depende de sua capacidade de representar com clareza os principais aspectos da hipótese adotada na pesquisa.

Com base nisso, o presente trabalho dispõe das seguintes variáveis e indicadores a serem analisados, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Potência do motor	Eficiência térmica do motor Trabalho de ciclo Diesel Cilindrada do motor Relação de compressão do motor Tempos do motor Poder calorífico do biodiesel Massa específica do biodiesel Poder Calorífico do hidrogênio Massa específica do hidrogênio
Torque do motor	Potência do motor Rotação do motor
Consumo do motor	Vazão mássica de entrada do biodiesel Vazão mássica de entrada do hidrogênio Potência efetiva do motor
Emissão do motor	Gases de escape

Fonte: Pesquisa direta (2025).

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

A coleta de dados consiste na reunião de informações relevantes sobre o tema abordado, com o objetivo de obter embasamento para a pesquisa por meio de revisões bibliográficas, observações e experimentos. Esse processo permite organizar as informações de forma a facilitar análises futuras e garantir a precisão dos resultados obtidos.

No presente estudo, a coleta de dados foi realizada por meio de manuais técnicos, normas, tabelas, catálogos e trabalhos acadêmicos já publicados, que auxiliam na compreensão e análise do desempenho de motores de combustão interna. A pesquisa em trabalhos anteriores é fundamental para simplificar cálculos e experimentos, além de assegurar condições mínimas de funcionamento do motor operando com a mistura de hidrogênio e biodiesel.

Conforme mencionado anteriormente, esta pesquisa possui caráter bibliográfico, quantitativo, qualitativo, descritivo e experimental. Dessa forma, todos os dados necessários para o estudo foram obtidos por meio de levantamento bibliográfico, utilizando livros, artigos científicos, dissertações e documentos técnicos. Além disso, será realizada uma parte experimental, na qual ocorrerão observações diretas para coletar dados empíricos que serão utilizados na avaliação do desempenho de um motor de combustão interna, comparando os dados teóricos e experimentais.

3.5 Tabulação dos Dados

Uma vez obtidos os dados por meio da pesquisa bibliográfica (site do fabricante do motor utilizado), a simulação é realizada no *software Diesel-RK*, permitindo a obtenção dos resultados do modelo proposto. Além disso, os dados obtidos tanto na simulação quanto na revisão bibliográfica são organizados e analisados no *software Microsoft Excel*, facilitando a interpretação dos resultados por meio da tabulação e análise estatística.

Na parte experimental, são coletados dados referentes ao desempenho do motor de combustão interna operando com o diesel. Serão analisados parâmetros como torque e potência. Esses dados são registrados, organizados e posteriormente comparados aos resultados da simulação e os dados fornecidos pelo fabricante.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo são apresentadas as formas de pesquisa adotadas para este trabalho, bem como as ferramentas e técnicas utilizadas para a análise de desempenho de um motor de combustão interna operando com uma mistura de hidrogênio e biodiesel como combustível. São detalhados os materiais e métodos empregados na pesquisa, incluindo a coleta, organização e tabulação dos dados obtidos tanto na revisão bibliográfica quanto na parte experimental.

No próximo capítulo são apresentados os resultados da análise de desempenho do motor de combustão interna operando com biodiesel puro e com a mistura de hidrogênio e biodiesel. São descritos os procedimentos utilizados na obtenção dos dados, os cálculos aplicados e, por fim, realizada uma discussão sobre os resultados obtidos, comparando-os entre as diferentes condições de operação.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem do motor e das simulações realizadas com dois tipos de combustível: inicialmente com o Diesel para a validação do modelo a ser utilizado no *software* Diesel-RK, e posteriormente com uma mistura de hidrogênio e biodiesel. As simulações são executadas no *software* Diesel RK, e os dados consolidados tanto por meio do próprio programa quanto com o auxílio do Excel. Além disso, é feita uma comparação entre os resultados obtidos a fim de facilitar a visualização dos resultados.

4.1 Validação do Modelo do MCI

Inicialmente, é realizada a coleta de dados utilizando como base para a simulação, os valores de configuração do motor BFD 5.0CV - PRO, da marca Buffalo, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Ficha Técnica motor BFD 5.0CV - PRO

Tipo	Diesel 4T, Refrigerado a Ar
Potência Máxima (Cv) (kW/rpm)	5,0 (3,7/3600)
Potência Reg. Contínuo (Cv) (kW/rpm)	3,8 (2,8/3600)
Torque Máximo (kgf.m/rpm)	1,30/2.500
Cilindrada (cm ³)	219
Diâmetro x Curso (mm)	70 X 57
Taxa de Compressão	20,5:1
Óleo Lubrificante (L / tipo)	0,75 / SAE 15W40
Combustível (L / tipo)	2,5 / Diesel S500
Consumo Médio (L/h)	1,4
Sistema de Alimentação (Tipo)	Injeção Mecânica
Sistema de Ignição	Compressão
Sistema de Partida	Manual
Sistema de Lubrificação (Tipo)	Forçado por Bomba
Filtro de Ar (Tipo)	Elemento de Papel
Dimensões C x L x A (mm)	450x430x480
Peso Bruto (kg)	23,8
Peso Líquido (kg)	20,8

Fonte: Adaptado de Buffalo (2025).

Também é apresentado um gráfico que exibe as curvas de torque e potência em função da rotação do motor, o que é usado para a validação do modelo proposto. A Figura 9 reúne essas curvas em uma única imagem, facilitando a análise dos resultados.

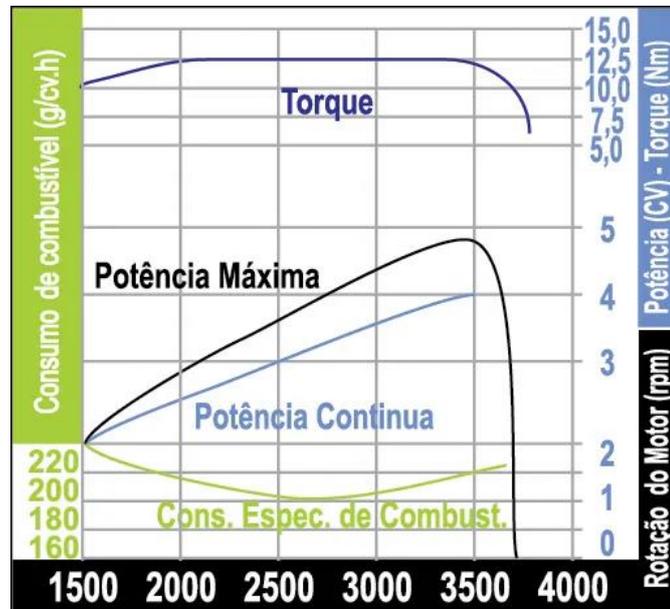


Figura 9: Curvas de desempenho do motor.
Fonte: Buffalo (2025).

Após inserir os dados do motor no *software*, conforme especificado na Tabela 6, e selecionar o combustível na interface (Diesel), são obtidos os resultados da simulação apresentados na Tabela 6, utilizados para a validação do *software*. A Figura 10 apresenta graficamente a validação do modelo. Para avaliar o desempenho do torque e da potência em função da rotação do motor, comparam-se os valores simulados com os fornecidos pelo fabricante através da Figura 9. Em seguida, calcula-se o erro percentual entre os valores reais (informados pelo fabricante) e os valores simulados de torque e potência em cada ponto de rotação. Esse erro percentual é determinado utilizando as equações (15) e (16).

Tabela 6: Valores para torque e potência reais e simulados pelo software Diesel RK.

Rotação do motor [rpm]	Torque real [N.m]	Torque Simulado [N.m]	Erro Torque	Potência real [CV]	Potência real [kW]	Potência Simulada [kW]	Erro Potência
1500	10,0	9,8	2%	2,0	1,47	1,5	-2%
1750	11,2	10,8	4%	2,5	1,84	1,9	-3%
2000	12,5	11,5	8%	2,9	2,13	2,3	-8%
2250	12,5	11,8	6%	3,3	2,43	2,6	-7%
2500	12,5	11,4	9%	3,7	2,72	2,9	-7%
2750	12,5	11,5	8%	4,0	2,94	3,2	-9%
3000	12,5	11,5	8%	4,4	3,23	3,5	-8%
3250	12,5	11,4	9%	4,6	3,38	3,7	-9%
3500	12,2	11,1	9%	4,9	3,60	3,9	-8%
3600	11,2	10,6	5%	5,0	3,68	3,9	-6%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

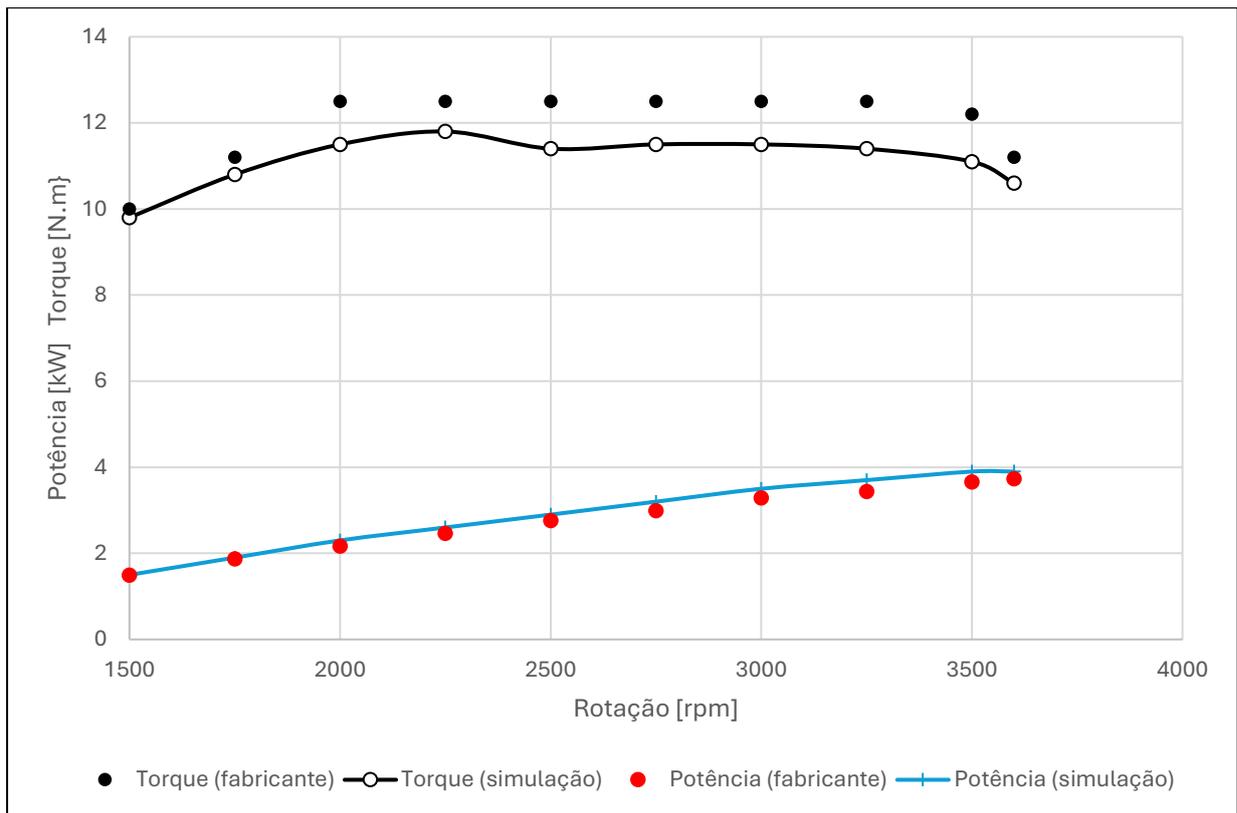


Figura 10: Valores para torque e potência do fabricante e da simulação.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

O modelo é ajustado progressivamente para convergir aos resultados fornecidos pelo fabricante, por meio de modificações realizadas no *software* Diesel-RK, alterando parâmetros como a relação ar-combustível, entre outros.

A partir da Tabela 6 e Figura 10, observa-se que a simulação do torque do motor apresentou erros variando entre 2% e 9%, sendo o menor erro registrado em 1500 rpm e os maiores em 2500, 3250 e 3500 rpm. A maioria dos valores de erro manteve-se abaixo de 10%, o que, em geral, é considerado aceitável em modelos de simulação, indicando que o mesmo representa de forma satisfatória o comportamento do torque do motor, ainda que pequenas discrepâncias possam ser notadas em faixas de rotação intermediárias e altas. Em relação à potência, a análise dos erros revela uma diferença percentual que varia de -2% a -9%, com todos os valores negativos, o que evidencia uma tendência sistemática de subestimação por parte do modelo. O maior desvio foi observado em 2750 rpm, enquanto o menor ocorreu em 1500 rpm. Essa subestimação pode estar relacionada a limitações nos parâmetros energéticos adotados na simulação ou a uma representação simplificada da eficiência térmica no modelo utilizado pelo *software* Diesel-RK.

4.2 Simulação do MCI com Biodiesel e Suas Misturas de Hidrogênio

As simulações são conduzidas utilizando o *software* DIESEL-RK, o qual possui uma biblioteca de combustíveis, incluindo biodiesel e hidrogênio. A ferramenta permite a criação de misturas personalizadas entre os combustíveis disponíveis, possibilitando avaliar os efeitos das diferentes proporções no funcionamento do motor. São analisados quatro combustíveis:

- 100% biodiesel;
- 90% biodiesel e 10% hidrogênio;
- 80% biodiesel e 20% hidrogênio;
- 70% biodiesel e 30% hidrogênio.

A seguir, os resultados são apresentados separadamente, com o apoio de tabelas e figuras. Em seguida, são realizadas comparações entre os parâmetros coletados nas simulações, considerando os percentuais das misturas de combustíveis.

4.2.1 Simulação usando 100% Biodiesel

Nesta etapa, a simulação da operação do motor com biodiesel é considerada. Os parâmetros de desempenho, como torque, potência e consumo específico de combustível, são analisados, bem como as emissões de NO_x e CO₂. Os resultados dessa simulação estão mostrados nas Tabelas 7 e 8. Uma comparação entre os resultados de torque e potência também é mostrada na Figura 11.

Tabela 7: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com 100% Biodiesel e comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel

Rotação do motor [rpm]	Torque Simulado Biodiesel [N.m]	Torque Simulado Diesel [N.m]	Comparação Entre Torque	Potência Simulada Biodiesel [kW]	Potência Simulada Diesel [kW]	Comparação Entre Potência
1500	9,12	9,8	-7%	1,43	1,5	-5%
1750	10,56	10,8	-2%	1,94	1,9	2%
2000	11,10	11,5	-4%	2,31	2,3	0%
2250	11,35	11,8	-4%	2,68	2,6	3%
2500	10,80	11,4	-6%	2,83	2,9	-2%
2750	10,75	11,5	-7%	3,10	3,2	-3%
3000	10,83	11,5	-6%	3,40	3,5	-3%
3250	10,55	11,4	-8%	3,59	3,7	-3%
3500	10,37	11,1	-7%	3,80	3,9	-3%
3600	10,10	10,6	-5%	3,79	3,9	-3%

Tabela 8: Resultados de simulação para as emissões (NOx e CO₂) do MCI com biodiesel e óleo diesel.

Consumo Específico 100% Biodiesel [kg/kWh]	Consumo Específico Diesel [kg/kWh]	Comparação Entre Consumo Específico %	NOx exaustão 100% Biodiesel [ppm]	NOx exaustão Diesel [ppm]	ComparaçãO Entre NOx Δ	CO2 exaustão 100% Biodiesel [g/kWh]	CO2 exaustão Diesel [g/kWh]	Comparação Entre CO2 %
0,34	0,267	21%	120	231	-111	971,97	860	12%
0,31	0,259	16%	240	36	204	879,42	832	5%
0,30	0,247	18%	164	41	123	847,64	795	6%
0,29	0,242	17%	142	35	107	831,64	778	6%
0,29	0,240	17%	304	130	174	831,30	773	7%
0,29	0,239	18%	314	150	164	827,34	769	7%
0,29	0,238	18%	300	129	171	825,01	766	7%
0,29	0,238	18%	355	196	159	829,74	765	8%
0,29	0,237	18%	564	366	198	822,14	763	7%
0,29	0,239	18%	603	497	106	827,15	765	8%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

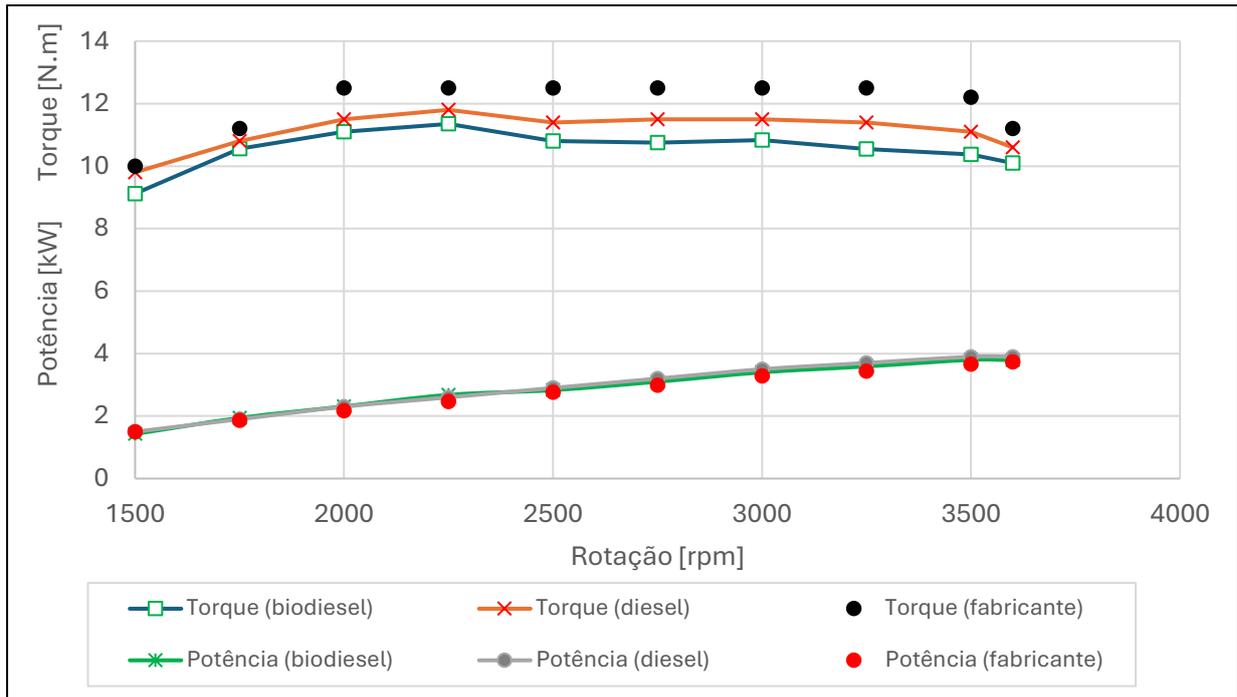


Figura 11: Resultados de Torque e Potência para o MCI (fabricante, e simulação do óleo diesel e biodiesel).
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 11 apresenta os perfis de torque e potência em função da rotação do motor para três condições distintas: dados fornecidos pelo fabricante, simulações com diesel e simulações com biodiesel.

Observa-se que os valores de torque obtidos com o combustível diesel acompanham de forma bastante próxima os dados fornecidos pelo fabricante, com diferenças marginais ao longo da faixa de rotação. O torque máximo do fabricante está em torno de 12,5 N·m, alcançado entre 2000 e 3000 rpm, sendo bem representado pela simulação com diesel. Já as simulações com biodiesel apresentam uma leve redução no torque em toda a faixa de operação, com um valor máximo em torno de 11,5 N·m, o que representa uma queda de aproximadamente 8% em relação ao torque máximo especificado pelo fabricante.

No que se refere à potência, tanto os dados do fabricante quanto as simulações com diesel e biodiesel mostram crescimento com o aumento da rotação, até aproximadamente 3500 rpm. Os valores simulados com diesel estão levemente acima daqueles obtidos com biodiesel, embora ambos sigam a mesma tendência de crescimento. A potência máxima simulada com diesel atinge cerca de 3,6 kW, valor semelhante ao indicado pelo fabricante. Por outro lado, a simulação com biodiesel apresenta uma potência máxima ligeiramente inferior, próxima a 3,4 kW.

Esses resultados indicam que, embora o uso do biodiesel mantenha o padrão operacional do motor, há perdas discretas de torque e potência, atribuídas às propriedades físico-químicas do biodiesel, como menor poder calorífico e maior viscosidade, que afetam o processo de combustão.

4.2.2 Simulação usando 90% Biodiesel e 10% Hidrogênio (B90H10)

A segunda simulação consiste no uso de uma mistura de 10% de hidrogênio e 90% de biodiesel como combustível, daqui em diante chamado de B90H10. Os resultados estão mostrados na Tabela 9 e 10.

Tabela 9: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com o B90H10, comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.

Rotação do motor [rpm]	Torque Simulado B90H10 [N.m]	Torque Simulado Diesel [N.m]	Comparação Entre Torque %	Potência Simulada B90H10 [kW]	Potência Simulada Diesel [kW]	Comparação Entre Potência %
1500	11,83	9,8	17%	1,86	1,5	19%
1750	12,77	10,8	15%	2,34	1,9	19%
2000	13,64	11,5	16%	2,86	2,3	20%
2250	14,14	11,8	17%	3,33	2,6	22%
2500	13,70	11,4	17%	3,58	2,9	19%
2750	13,70	11,5	16%	3,94	3,2	19%
3000	13,85	11,5	17%	4,35	3,5	20%
3250	13,62	11,4	16%	4,64	3,7	20%
3500	13,30	11,1	17%	4,88	3,9	20%
3600	13,00	10,6	18%	4,91	3,9	21%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Tabela 10: Resultados de simulação para as emissões (NOx e CO2) do MCI com B90H10 e óleo diesel.

Consumo Específico B90H10 [kg/kWh]	Consumo Específico Diesel [kg/kWh]	Comparação Entre Consumo Específico %	NOx Exaustão B90H10 [ppm]	NOx Exaustão Diesel [ppm]	Comparação Entre NOx Δ	CO2 Exaustão B90H10 [g/kWh]	CO2 Exaustão Diesel [g/kWh]	Comparação Entre CO2 %
0,25	0,267	-7%	2308,7	231	151	718,46	860	-20%
0,25	0,259	-4%	2688,2	36	334	702,38	832	-18%
0,23	0,247	-7%	2465,9	41	266	669,18	795	-19%
0,23	0,242	-5%	2238,4	35	201	654,44	778	-19%
0,22	0,240	-9%	2721,3	130	438	644,49	773	-20%
0,22	0,239	-9%	2707,6	150	450	638,29	769	-20%
0,22	0,238	-8%	2630,8	129	425	633,95	766	-21%
0,22	0,238	-8%	2723,4	196	528	632,18	765	-21%
0,22	0,237	-8%	3208	366	820	630,41	763	-21%
0,22	0,239	-9%	3337,2	497	943	630,29	765	-21%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nas Tabelas 9 e 10 observa-se uma melhoria média nos valores de torque (17%) e potência (20%). E uma redução média de consumo específico (7%) e CO₂ na exaustão (20%). Em contrapartida, os níveis de NO_x apresentaram uma diferença de até 99% em relação ao motor funcionando somente com Diesel, devido à elevação da temperatura de combustão causada pela fração de hidrogênio adicionada.

4.2.3 Simulação usando 80% Biodiesel e 20% Hidrogênio (B80H20)

A terceira simulação considera o uso de uma mistura composta por 20% de hidrogênio e 80% de biodiesel como combustível. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com o B80H20, comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.

Rotação do motor [rpm]	Torque Simulado B80H20 [N.m]	Torque Simulado Diesel [N.m]	Comparação Entre Torque %	Potência Simulada B80H20 [kW]	Potência Simulada Diesel [kW]	Comparação Entre Potência %
1500	13,93	9,8	30%	2,19	1,5	32%
1750	14,98	10,8	28%	2,75	1,9	31%
2000	16,00	11,5	28%	3,35	2,3	31%
2250	16,64	11,8	29%	3,92	2,6	34%
2500	16,08	11,4	29%	4,21	2,9	31%
2750	16,28	11,5	29%	4,69	3,2	32%
3000	16,50	11,5	30%	5,19	3,5	33%
3250	16,32	11,4	30%	5,55	3,7	33%
3500	15,95	11,1	30%	5,84	3,9	33%
3600	15,61	10,6	32%	5,88	3,9	34%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Tabela 12: Resultados de simulação para as emissões (NO_x e CO₂) do MCI com B80H20 e óleo diesel.

Consumo Específico B80H20 [kg/kWh]	Consumo Específico Diesel [kg/kWh]	Comparação Entre Consumo Específico %	NO _x Exaustão B80H20 [ppm]	NO _x Exaustão Diesel [ppm]	Comparação Entre NO _x Δ	CO ₂ Exaustão B80H20 [g/kWh]	CO ₂ Exaustão Diesel [g/kWh]	Comparação Entre CO ₂ %
0,21	0,267	-27%	4242	231	1129	598,58	860	-44%
0,21	0,259	-23%	4149	36	793	588,96	832	-41%
0,20	0,247	-24%	4170	41	669	558,51	795	-42%
0,19	0,242	-27%	4119	35	558	545,26	778	-43%
0,19	0,240	-26%	4480	130	974	534,84	773	-45%
0,18	0,239	-33%	4505	150	970	528,29	769	-46%
0,18	0,238	-32%	4492	129	482	523,68	766	-46%
0,18	0,238	-32%	4183	196	1029	524,83	765	-46%
0,18	0,237	-32%	4842	366	836	518,70	763	-47%
0,18	0,239	-33%	4927	497	1471	518,14	765	-48%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Nas Tabelas 11 e 12, observa-se que os ganhos de desempenho se tornaram mais expressivos, embora mantenham o mesmo padrão identificado na segunda simulação. Verifica-se uma melhoria média de 30% no torque e 32% na potência. Além disso, houve uma redução média de 29% no consumo específico e de 45% nas emissões de CO₂ na exaustão. Por outro lado, os níveis de NO_x aumentaram em até 99% em comparação com a simulação utilizando apenas diesel. Esse aumento pode ser atribuído à elevação da temperatura de combustão, decorrente da maior fração de hidrogênio na mistura.

4.2.4 Simulação usando 70% Biodiesel e 30% Hidrogênio (B70H30)

A quarta simulação envolve a mistura composta por 30% de hidrogênio e 80% de biodiesel como combustível. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13: Resultados de Desempenho (Torque e Potência) simulados do MCI com o B70H30, comparação entre esses valores com a simulação usando óleo diesel.

Rotação do motor [rpm]	Torque Simulado B70H30 [N.m]	Torque Simulado Diesel [N.m]	Comparação Entre Torque %	Potência Simulada B70H30 [kW]	Potência Simulada Diesel [kW]	Comparação Entre Potência %
1500	15,67	9,8	37%	2,46	1,5	39%
1750	16,81	10,8	36%	3,08	1,9	38%
2000	18,12	11,5	37%	3,79	2,3	39%
2250	18,93	11,8	38%	4,46	2,6	42%
2500	18,53	11,4	38%	4,85	2,9	40%
2750	18,65	11,5	38%	5,87	3,2	45%
3000	18,98	11,5	39%	5,96	3,5	41%
3250	18,65	11,4	39%	6,35	3,7	42%
3500	18,27	11,1	39%	6,70	3,9	42%
3600	18,00	10,6	41%	6,80	3,9	43%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Tabela 14: Resultados de simulação para as emissões (NO_x e CO₂) do MCI com B70H30 e óleo diesel.

Consumo Específico B70H30 [kg/kWh]	Consumo Específico Diesel [kg/kWh]	Comparação Entre Consumo Específico %	NO _x Exaustão B70H30 [ppm]	NO _x Exaustão Diesel [ppm]	Comparação Entre NO _x Δ	CO ₂ Exaustão B70H30 [g/kWh]	CO ₂ Exaustão Diesel [g/kWh]	Comparação Entre CO ₂ %
0,18	0,267	-48%	5209	231	2035	517,33	860	-66%
0,18	0,259	-44%	5213	36	900	511,21	832	-63%
0,17	0,247	-45%	5290	41	1337	482,51	795	-65%
0,17	0,242	-42%	5268	35	1166	470,12	778	-65%
0,16	0,240	-50%	5467	130	1577	459,76	773	-68%

Consumo Específico B70H30 [kg/kWh]	Consumo Específico Diesel [kg/kWh]	Comparação Entre Consumo Específico %	NOx Exaustão B70H30 [ppm]	NOx Exaustão Diesel [ppm]	Comparação Entre NOx Δ	CO2 Exaustão B70H30 [g/kWh]	CO2 Exaustão Diesel [g/kWh]	Comparação Entre CO2 %
0,16	0,239	-49%	5518	150	1528	453,69	769	-69%
0,16	0,238	-49%	5579	129	1489	448,77	766	-71%
0,16	0,238	-49%	5658	196	1653	449,00	765	-70%
0,15	0,237	-58%	5706	366	1902	443,08	763	-72%
0,15	0,239	-59%	5797	497	2016	442,10	765	-73%

Fonte: Pesquisa direta (2025).

Na última simulação, com 30% de hidrogênio na mistura, o motor apresentou o melhor desempenho global entre todas as configurações analisadas. O torque e a potência aumentaram, em média, cerca de 38% e 41%, respectivamente. O consumo específico foi reduzido em até 59%, enquanto as emissões de CO₂ apresentaram uma diminuição de até 73%. No entanto, as emissões de NOx atingiram os maiores valores, com um aumento de até 99% em relação à simulação com diesel puro.

4.2.5 Comparação dos Resultados da Simulação em Função da Adição de Hidrogênio

Após a análise individual de cada simulação, é realizada uma comparação geral dos principais parâmetros de desempenho e emissões do motor em função da variação da proporção de hidrogênio na mistura com o biodiesel. Os dados comparativos permitem observar as tendências e os impactos diretos da adição progressiva de hidrogênio no comportamento do motor de combustão interna. O gráfico da Figura 12 mostra os resultados de simulação do torque no motor de combustão interna.

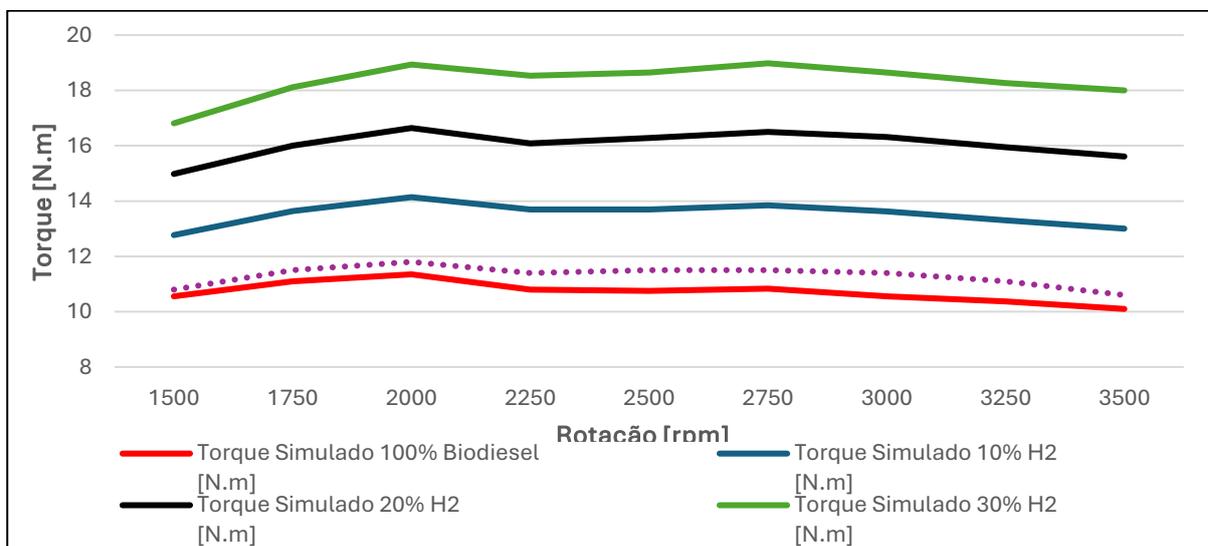


Figura 12: Comparação do torque em função da proporção de hidrogênio.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 12 apresenta os resultados simulados de torque em função da rotação do motor para diferentes proporções de hidrogênio misturados ao biodiesel. Observa-se que a adição de hidrogênio ao biodiesel resulta em um aumento progressivo do torque em toda a faixa de rotação analisada. A curva correspondente ao combustível puro (100% biodiesel) apresenta os menores valores de torque, enquanto a mistura com 30% de hidrogênio apresenta o melhor desempenho, atingindo cerca de 18,9 N.m na rotação de 2000 rpm e cerca de 19 N.m na rotação de 2750 rpm.

O comportamento do torque segue uma tendência típica de motores de combustão interna: crescimento até determinada rotação e leve declínio em rotações mais altas. Ainda assim, mesmo nas altas rotações (acima de 2750 rpm), as misturas com hidrogênio continuam superando o desempenho do biodiesel puro. Esse ganho pode ser atribuído às propriedades favoráveis do hidrogênio, como maior poder calorífico, melhor flamabilidade e maior velocidade de chama, que contribuem para uma combustão mais eficiente e melhor aproveitamento da energia do combustível.

Os resultados simulados indicam que a utilização de misturas biodiesel-hidrogênio pode ser uma estratégia promissora para otimizar o desempenho de motores de ignição por compressão. Contudo, é importante considerar aspectos práticos, como o controle da mistura, a segurança no manuseio do hidrogênio e os ajustes no sistema de injeção.

A Figura 13 mostra os resultados da simulação para a potência do motor.

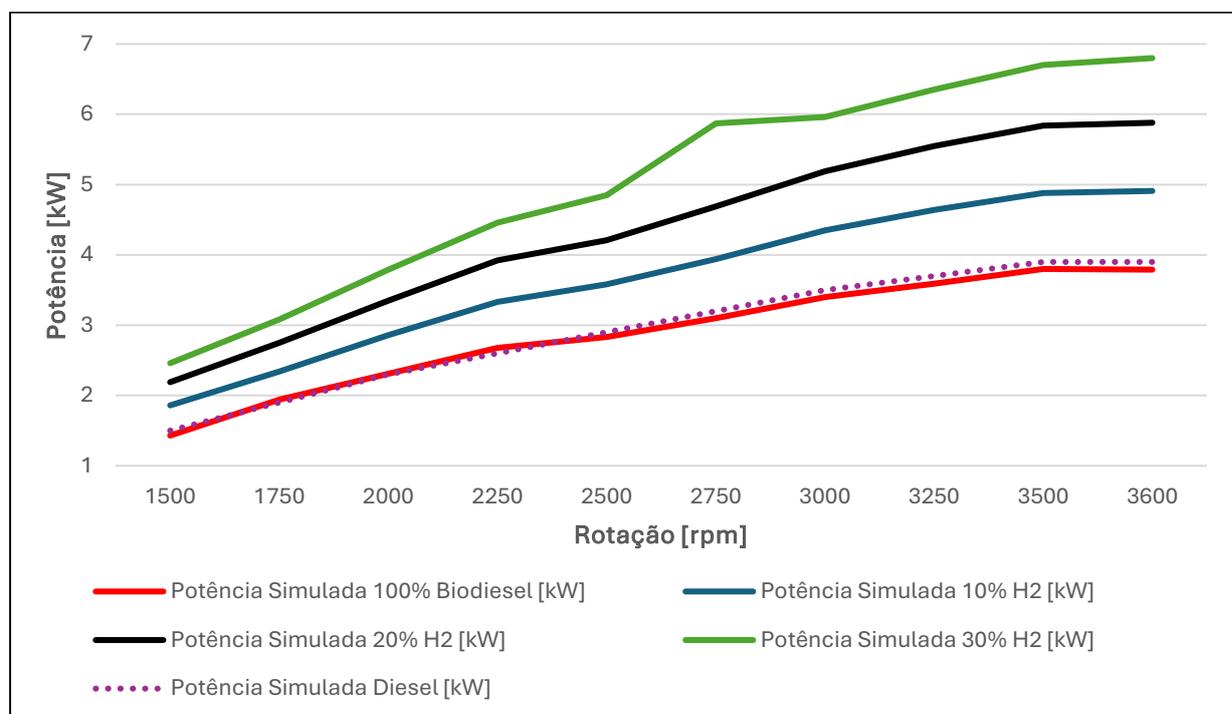


Figura 13: Comparação da potência em função da proporção de hidrogênio.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Observa-se na Figura 13 que os valores simulados de potência do motor em função da rotação para diferentes proporções de hidrogênio adicionadas ao biodiesel. Nota-se uma tendência clara de aumento de potência com o acréscimo de hidrogênio, sendo a mistura com 30% de H₂ a que proporciona o melhor desempenho, alcançando valores próximos a 6,8 kW em 3600 rpm. A potência cresce com o aumento da rotação para todas as composições, e a separação entre as curvas evidencia a influência positiva da presença de hidrogênio no combustível.

A mistura com 10% de hidrogênio já apresenta uma melhora significativa em relação ao biodiesel puro, e esse ganho se intensifica nas proporções de 20% e 30% de H₂. A adição de hidrogênio contribui para uma queima mais completa e eficiente, o que se reflete diretamente no aumento da potência entregue pelo motor. Essa melhoria de desempenho pode ser atribuída às propriedades do hidrogênio, como seu alto poder calorífico e maior velocidade de propagação da chama, que favorecem a liberação mais rápida e eficaz da energia química contida na mistura combustível.

A Figura 14 mostra a comparação entre o consumo específico na utilização de biodiesel puro e adições de 10%, 20% e 30% de hidrogênio ao biodiesel.

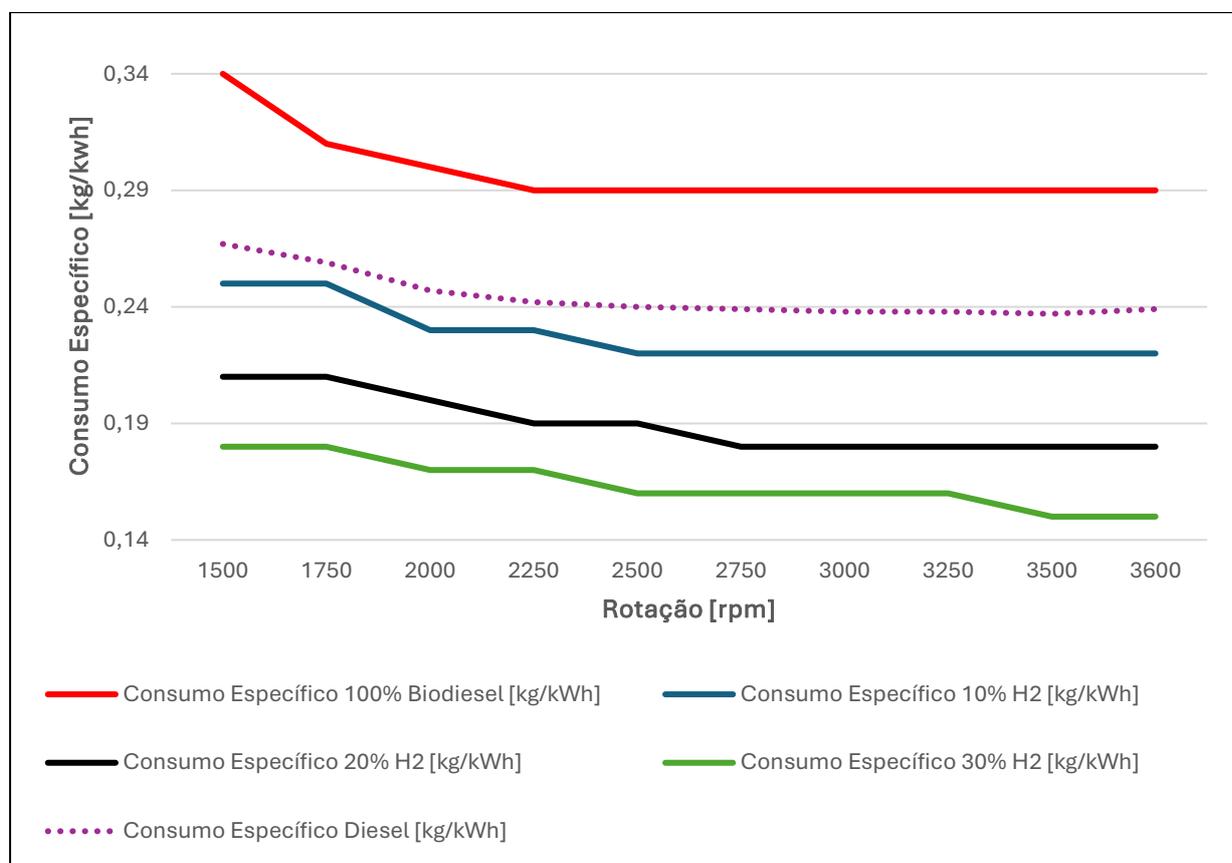


Figura 14: Comparação do consumo específico de combustível em função da proporção de hidrogênio.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

Verifica-se na Figura 14 que os valores simulados de consumo específico de combustível (kg/kWh) em função da rotação do motor, considerando diferentes proporções de hidrogênio misturado ao biodiesel. Os dados mostram que o consumo específico diminui significativamente com o aumento da fração de hidrogênio na mistura, sendo mais elevado para o biodiesel puro e mais baixo para a mistura com 30% de H₂. Isso indica que o motor se torna mais eficiente energeticamente ao operar com combustíveis contendo hidrogênio.

A curva do biodiesel puro apresenta os maiores valores de consumo específico em toda a faixa de operação, estabilizando-se em torno de 0,29 kg/kWh a partir de 2250 rpm. Com a adição de 10% e 20% de hidrogênio, há uma redução consistente nesse indicador, refletindo um melhor aproveitamento da energia contida no combustível. A mistura com 30% de hidrogênio apresenta os menores valores, atingindo cerca de 0,15 kg/kWh nas rotações mais altas, o que representa uma redução de quase 50% em relação ao uso exclusivo de biodiesel.

Esses resultados reforçam o potencial do uso de hidrogênio como aditivo energético para melhorar a eficiência de motores a biodiesel. A redução do consumo específico implica em menor necessidade de combustível para produzir a mesma quantidade de energia, o que pode contribuir para a redução de custos operacionais e impacto ambiental. No entanto, a aplicação prática dessa estratégia exige análise de viabilidade técnica, incluindo segurança no armazenamento de hidrogênio, estabilidade da mistura e compatibilidade com o sistema de injeção.

Conforme a Figura 15, a comparação entre a concentração de NO_x nos gases de exaustão na utilização de biodiesel puro e adições de 10%, 20% e 30% de hidrogênio ao biodiesel, utilizando a razão de equivalência ar-combustível na zona de queima igual a 0.88, 0.80 e 0.72 respectivamente.

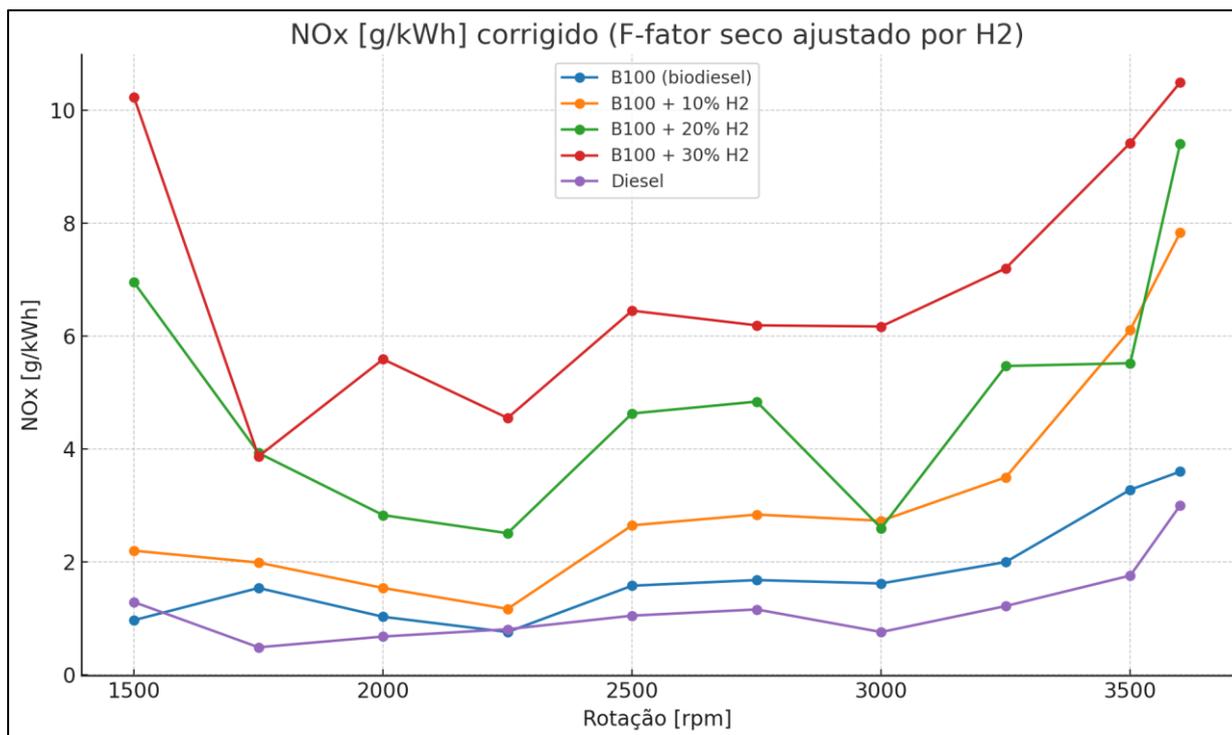


Figura 15: Comparação das emissões de NO_x em função da proporção de hidrogênio.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 15 apresenta os valores simulados das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) na exaustão do motor em função da rotação, para diferentes proporções de hidrogênio misturado ao biodiesel. Observa-se uma tendência clara de aumento nas emissões de NO_x com o acréscimo de hidrogênio à mistura, sendo os menores valores associados ao uso exclusivo de biodiesel e os maiores com a adição de 30% de H₂. As curvas indicam que as emissões aumentam com a rotação do motor.

Os resultados obtidos para as emissões específicas de NO_x em função da rotação do motor mostram comportamentos distintos entre os combustíveis avaliados. O diesel e o biodiesel puro apresentam valores relativamente baixos, variando de 3 a 5 g/kWh, faixa compatível com dados da literatura que apontam emissões em torno de 3,9 g/kWh para o B100. Essa proximidade reforça a consistência dos cálculos realizados, uma vez que o biodiesel, em razão do maior teor de oxigênio em sua molécula, tende a apresentar um leve incremento de NO_x em relação ao diesel, mas ainda dentro de limites esperados para motores de ignição por compressão.

A análise do gráfico de NO_x [g/kWh] corrigido evidencia um aumento expressivo das emissões à medida que cresce a fração energética de hidrogênio nas misturas. Para o caso de B100 com 10% de H₂, já se observa elevação notável em todas as rotações, mas é com 20% e 30% de H₂ que os valores ultrapassam a faixa de referência, chegando a mais de 10 g/kWh em regimes de rotação mais altos. Esse comportamento está de acordo com estudos que relatam

valores próximos a 10,4 g/kWh para misturas contendo 38% de hidrogênio, confirmando que o acréscimo de H₂ promove maiores temperaturas de chama e acelera a cinética de formação de óxidos de nitrogênio.

Embora os resultados demonstrem coerência com tendências reportadas (vide Tabela 15), deve-se destacar que a magnitude das emissões também depende da configuração experimental adotada. Estratégias de mitigação, como a recirculação de gases de escape (EGR) e ajustes de admissão, podem reduzir a formação de NO_x em motores operando com adição de hidrogênio. Dessa forma, o gráfico corrigido não apenas confirma a tendência de aumento das emissões específicas de NO_x com a presença de H₂, mas também ressalta a necessidade de estudos complementares voltados à aplicação de técnicas de controle que possibilitem compatibilizar o uso do hidrogênio com limites regulatórios vigentes. A Tabela 15 mostra um resumo comparativo deste estudo com os estudos da literatura.

Tabela 15 - Resumo comparativo das emissões de NO_x

Combustível	Este trabalho	Referência experimental	Referências
Diesel / Biodiesel (0% H ₂)	~3–5 g/kWh	~3,9 g/kWh para 100% de biodiesel	Tutak et al., 2020 Hansen et al., 2006 Ramalingam et al., 2025 Al Awadh e Gulbarga, 2025
Biodiesel + ≈38 % H ₂	>10 g/kWh	~10,4 g/kWh	Tutak et al., 2020

A Figura 16 mostra a comparação entre a concentração de CO₂ nos gases de exaustão na utilização de biodiesel puro e adições de 10%, 20% e 30% de hidrogênio ao biodiesel.

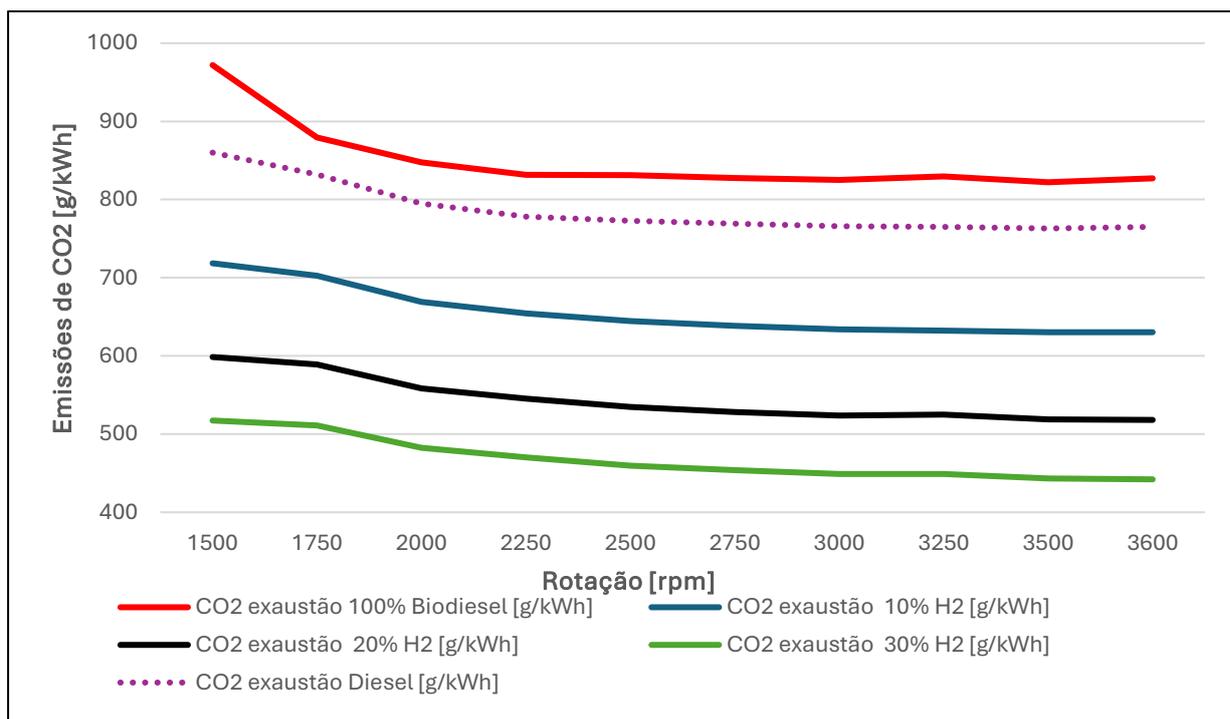


Figura 16: Comparação das emissões de CO₂ em função da proporção de hidrogênio.
Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 16 apresenta os valores simulados de emissões de CO₂ em função da rotação para diferentes proporções de hidrogênio adicionadas ao biodiesel. Observa-se uma tendência clara de redução nas emissões à medida que se aumenta a proporção de hidrogênio na mistura, evidenciando o impacto positivo da adição de H₂ na diminuição desse poluente emitido pelo motor.

A mistura com 30% de hidrogênio demonstra o melhor desempenho ambiental, apresentando os menores níveis de emissão de CO₂ em todas as faixas de rotação analisadas, com valores que se aproximam de 440 g/kWh a 3600 rpm. Em contraste, o biodiesel puro (100%) apresenta os maiores níveis de emissão, superando 970 g/kWh nas rotações mais baixas e mantendo-se acima das demais curvas em todas as faixas.

A redução nas emissões se intensifica à medida que a proporção de hidrogênio aumenta. A adição de 10% de H₂ já proporciona uma redução significativa em relação ao biodiesel puro, sendo que proporções maiores, como 20% e 30%, amplificam ainda mais esse efeito. Isso ocorre, possivelmente, devido à queima mais limpa do hidrogênio, que por não conter carbono em sua composição, não gera CO₂ durante a combustão. Além disso, o elevado poder calorífico do hidrogênio e sua velocidade de chama favorece uma combustão mais limpa e eficiente, com menor geração de resíduos gasosos. Desse modo, o uso de misturas com H₂ contribui

simultaneamente para a eficiência do motor e para a redução dos impactos ambientais associados às emissões.

No entanto, os resultados também indicam um aumento nas emissões de NO_x, o que exige estratégias de mitigação, como recirculação dos gases de escape (EGR), controle da razão estequiométrica ou aplicação de tecnologias de pós-tratamento. Assim, o uso combinado de biodiesel e hidrogênio deve ser cuidadosamente planejado, de forma a equilibrar ganhos em eficiência energética com um desempenho ambiental adequado.

4.2.6 Comparação utilizando o Diesel como combustível, entre Simulação, Dados Experimentais e Especificações do Fabricante

Nesta seção, realiza-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos por simulação computacional, os dados experimentais obtidos em bancada e as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do motor. O objetivo é verificar a consistência entre os diferentes conjuntos de dados, identificar possíveis discrepâncias e avaliar a fidelidade do modelo numérico em reproduzir o desempenho real e as características declaradas pelo fabricante.

A Figura 17 mostra a comparação dos valores de torque em função da rotação do motor, considerando os resultados da simulação, os dados experimentais e as informações fornecidas pelo fabricante. Ressalta-se que os dados experimentais se referem ao uso de óleo diesel como combustível.

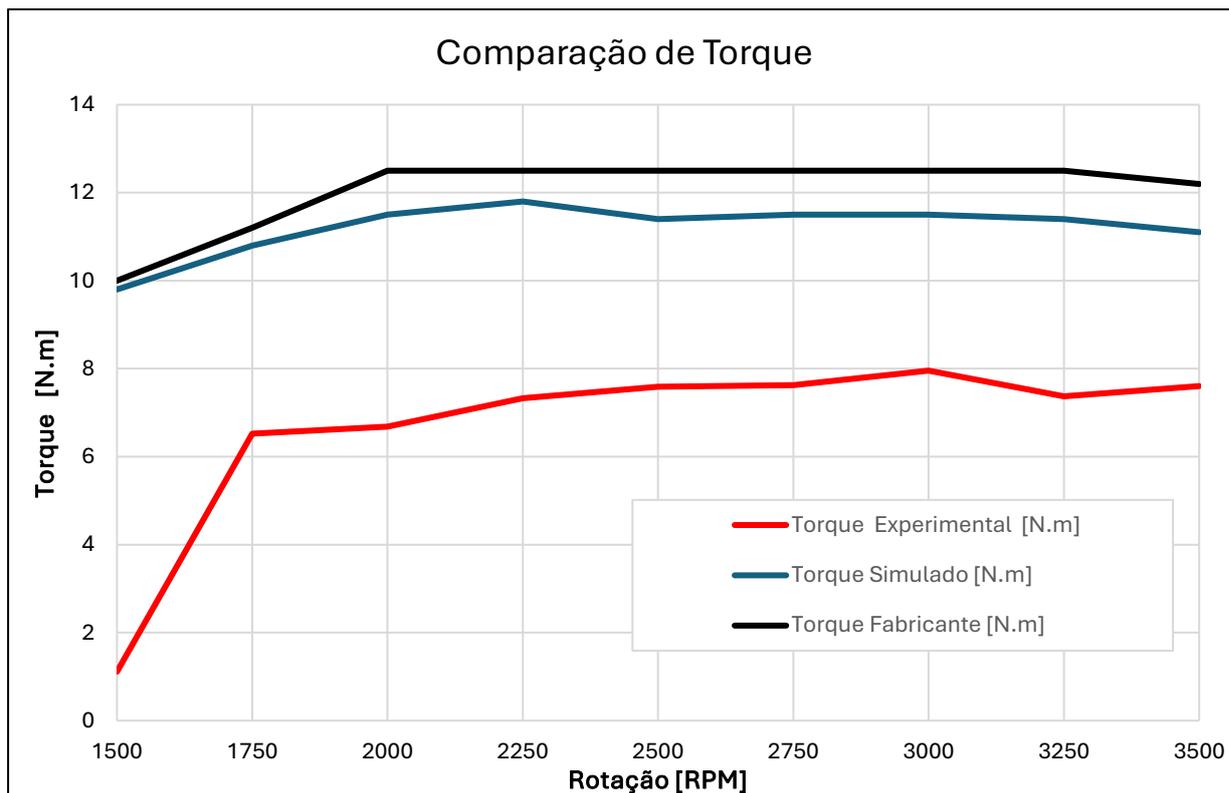


Figura 17: Comparação do torque obtido por simulação, experimento prático e dados do fabricante em função da rotação.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

De acordo com a Figura 17, o torque obtido por simulação acompanha de forma consistente os valores fornecidos pelo fabricante em toda a faixa de rotação analisada, com diferenças inferiores a 1 N·m, o que indica boa calibração do modelo numérico. Observa-se que o torque simulado atinge o pico próximo de 12 N·m, valor muito próximo ao especificado pelo fabricante, o que reforça a fidelidade da modelagem computacional.

Por outro lado, os valores experimentais apresentam magnitudes significativamente inferiores, com uma diferença média da ordem de 3 a 4 N·m em relação aos dados do fabricante. Essa discrepância é mais acentuada nas baixas rotações (1500 a 2000 rpm), onde o torque experimental não ultrapassa 7 N·m, enquanto os outros conjuntos de dados já atingem valores superiores a 11 N·m.

Essa diferença pode estar relacionada a diversos fatores: perdas mecânicas adicionais não consideradas no modelo, como atrito interno e inércia dos componentes; condições não ideais de operação durante os ensaios, como temperatura ambiente, lubrificação e qualidade do combustível; além de possíveis limitações dos instrumentos utilizados para aquisição dos dados experimentais. Tais divergências indicam a necessidade de revisão do procedimento experimental, com especial atenção às condições de carga e controle de variáveis externas, ou mesmo ajustes no sistema de aquisição.

Apesar dessas limitações, os resultados experimentais seguem a tendência geral das curvas simulada e do fabricante, o que sugere que a metodologia empregada nos testes possui potencial de aprimoramento para alcançar maior aderência aos dados de referência.

A Figura 18 apresenta a comparação dos valores de potência obtidos por simulação, ensaios experimentais e dados do fabricante, considerando diferentes rotações do motor.

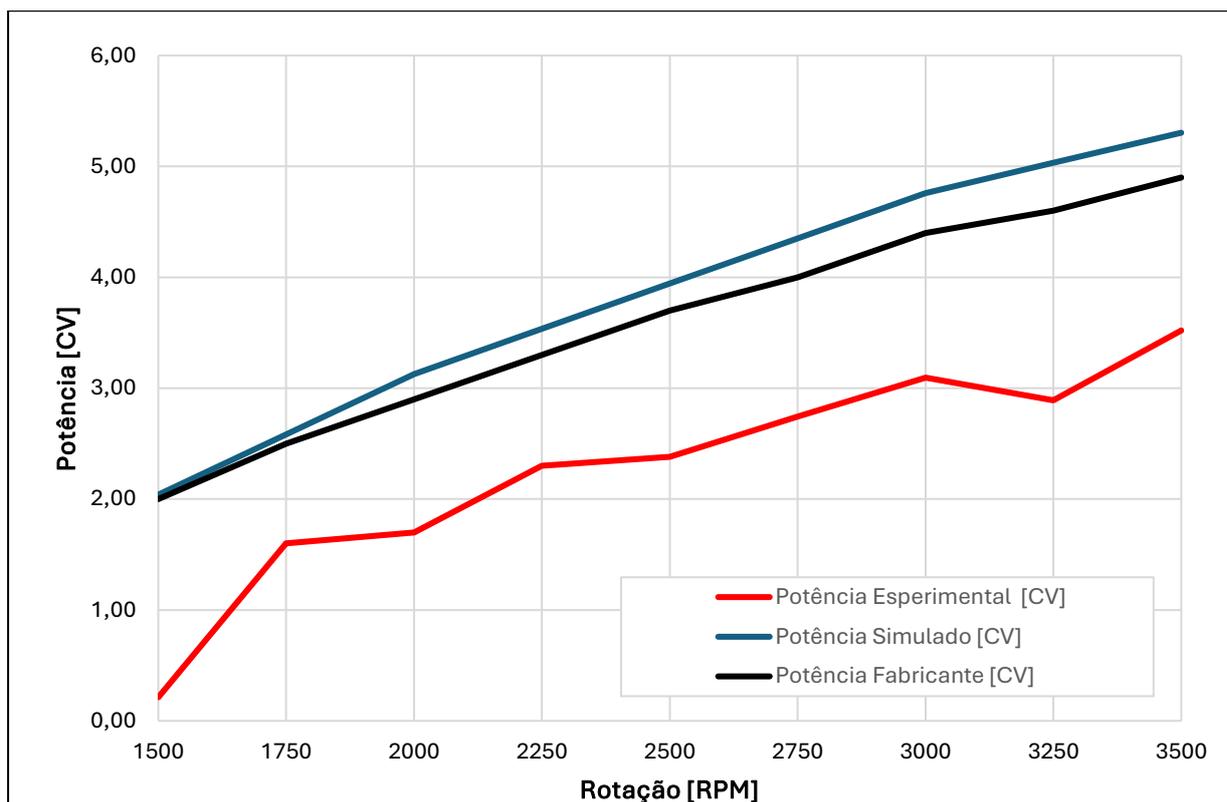


Figura 18: Comparação da potência obtida por simulação, experimento prático e dados do fabricante em função da rotação.

Fonte: Pesquisa direta (2025).

A Figura 18 apresenta a comparação dos valores de potência em função da rotação do motor, considerando os dados obtidos por simulação, ensaios experimentais e as especificações fornecidas pelo fabricante. Observa-se que a potência simulada acompanha de forma bastante próxima os dados do fabricante ao longo de toda a faixa de rotação, com uma leve tendência de superestimação, especialmente em rotações mais elevadas. Isso sugere que o modelo numérico é eficaz em reproduzir o comportamento esperado do motor, embora possa superestimar a eficiência volumétrica ou a taxa de conversão de energia em altas rotações.

Por outro lado, os valores experimentais apresentam magnitudes inferiores em comparação às demais curvas, com discrepâncias mais significativas nas rotações acima de 2500 rpm. Em 3500 rpm, por exemplo, a potência experimental atinge cerca de 3,6 CV, enquanto a

simulada ultrapassa 5,2 CV e a do fabricante alcança aproximadamente 4,8 CV. Essa diferença pode ser atribuída a perdas mecânicas, limitações do sistema de carga durante os ensaios, possíveis erros de medição ou à condição real do motor testado, que pode não corresponder exatamente ao estado ideal previsto pelo fabricante ou pelo modelo simulado.

Ainda assim, a curva experimental apresenta uma tendência de crescimento compatível com as demais, indicando que, apesar das discrepâncias em valor absoluto, o comportamento qualitativo da resposta do motor está corretamente representado. Essa consistência entre as tendências sugere que, com ajustes no procedimento experimental e na calibração dos sensores, é possível melhorar a aderência dos dados experimentais às referências numérica e de fábrica.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas a partir da análise teórica, das simulações realizadas com o uso de misturas de hidrogênio e biodiesel em motores de combustão interna de ignição por compressão, por meio do *software* Diesel RK. Além disso, são propostas recomendações para estudos futuros que visem aprimorar a eficiência, a segurança e a aplicabilidade dessas misturas combustíveis no setor automotivo.

5.1 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo avaliar, por meio de simulações computacionais com o *software* Diesel-RK, os efeitos da adição de hidrogênio ao biodiesel no desempenho, no consumo de combustível e nas emissões de um motor de ignição por compressão. São analisadas quatro proporções crescentes de hidrogênio (0%, 10%, 20% e 30%) misturado ao biodiesel, e os resultados são comparados com o uso exclusivo de diesel e de biodiesel puro (B100).

As simulações demonstram que a introdução de hidrogênio ao biodiesel influencia positivamente o desempenho térmico do motor. O torque médio apresenta aumento de até 71% em relação ao biodiesel puro, enquanto a potência aumenta até 51% em comparação ao diesel. Além disso, observa-se uma significativa redução no consumo específico de combustível, chegando a uma queda de 59% na mistura com 30% de hidrogênio (B70H30), o que evidencia uma melhora considerável na eficiência energética do sistema.

Quanto às emissões, a adição de hidrogênio resulta em reduções relevantes de dióxido de carbono (CO₂), com destaque para a simulação com o combustível B70H30, que apresenta até 73% de redução em relação ao diesel. Este dado demonstra o potencial da mistura como alternativa, mas esse efeito do NO_x tem que ser avaliado.

Entretanto, um aspecto crítico identificado é o aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), em função da maior temperatura de combustão causada pelo hidrogênio. Os acréscimos nas emissões de NO_x chegam a 90% em relação ao diesel e o B90H10, 96% com B80H20 e 97% com B70H30. Os resultados mostraram que as emissões específicas de NO_x para diesel e biodiesel puro permaneceram em níveis baixos e próximos aos relatados na literatura, confirmando a consistência dos cálculos. Por outro lado, a adição de hidrogênio levou a aumentos expressivos, sobretudo a partir de 20% em energia, quando os valores ultrapassaram 10 g/kWh, tendência também descrita em estudos experimentais. Assim, os resultados de NO_x evidenciam que, embora o hidrogênio melhore a eficiência da combustão, sua presença intensifica a formação

de NOx, reforçando a necessidade de aplicação de estratégias de mitigação, como recirculação de gases de escape (EGR), catalisadores ou ajustes no ponto de injeção, para viabilizar ambientalmente o uso dessas misturas.

Dessa forma, a pergunta-problema deste trabalho “Como a adição de hidrogênio ao biodiesel influencia o desempenho térmico, o consumo de combustível e as emissões de um motor de ignição por compressão?” foi respondida. Verifica-se que a adição de hidrogênio proporciona ganhos no desempenho térmico e na eficiência do motor, bem como reduz as emissões de CO₂. No entanto, provoca aumentos nas emissões de NOx, o que exige soluções complementares para mitigar seus efeitos negativos sobre o meio ambiente.

Conclui-se, portanto, que o uso de misturas de hidrogênio e biodiesel apresenta grande potencial para o futuro da mobilidade sustentável, contribuindo para uma matriz energética mais limpa e eficiente. Este estudo indica que a integração dessas tecnologias pode ser uma estratégia promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, mitigar impactos ambientais e aumentar o desempenho dos motores de combustão interna, especialmente em países com forte produção de biocombustíveis como o Brasil.

5.2 Recomendações

Com base nos resultados alcançados, recomenda-se:

- Investigações futuras sobre estratégias de controle de emissões de Nox:
- Desenvolvimento de sistemas de injeção híbridos, capazes de controlar de forma mais precisa a entrada de hidrogênio e biodiesel simultaneamente:
- Exploração de outras formas de produção de hidrogênio, especialmente as renováveis, como a eletrólise utilizando energia solar ou eólica.
- Medir as emissões dos poluentes (todos) e as temperaturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **ANP aprova alterações nas regras para autorização de produção de biocombustíveis.** Comunicado publicado em 07 de agosto de 2025. Brasília, DF. Disponível em: [site da ANP]. Acesso em: 08 ago. 2025.

AL AWADH M, GULBARGA MI. **Innovative AI analysis and experimental study of hydrogen-enriched clean fuel in modern fossil fuel engines.** Sci Rep. 2025 Apr 28;15(1):14854. doi: 10.1038/s41598-025-98201-x. PMID: 40295596; PMCID: PMC12038035.

ALUGAGERA. **Diferenças entre motores do ciclo Otto e ciclo Diesel.** Disponível em: <https://alugagera.com.br/noticias/diferen%C3%A7as-entre-motores-do-ciclo-otto-e-ciclo-diesel>. Acesso em: 22 jan. 2025.

AMARAL, L. V. **Estudo da eficiência de conversão de combustíveis de motor de ignição por centelha enriquecidos com mistura rica em hidrogênio obtida via reforma catalítica.** Handle.net, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/74016>. Acesso em: 20 fev. 2025.

BAUER, W.; WESTFALL, G. D. **Física para Universitários.** Grupo A, 2012. E-book. ISBN 9788580550955. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580550955/>. Acesso em: 31 jan. 2025.

BERNABE, J.; LUCIANO, A. **Sistema de armazenamento de gás hidrogênio para aplicações em energia.** Unicesumar, 2018. Disponível em: https://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/2370/1/jonathan_henrique_bernabe.pdf. Acesso em: 17 fev. 2025.

BRUNELLI, R. **Estudo de viabilidade operacional e desempenho de motores de combustão interna operando com combustível biodiesel em relação ao combustível diesel automotivo.** 2009. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia – UFRGS, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17562/000720265.pdf?sequence=1?>. Acesso em: 29 jan. 2025.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna.** 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2018. E-book. ISBN 9788521212942. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521212942/>. Acesso em: 08 dez. 2024.

CASTRO, F. D.; RAHDE, S. B. **Motores automotivos: evolução, manutenção e tendências**. 1. ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2014. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 31 jan. 2025.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. E-book. ISBN 9788580552010. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580552010/>. Acesso em: 08 dez. 2024.

DAMASCENA, P. J. V.; GÓES, V. Z. **Viabilidade técnica da utilização de hidrogênio produzido “in situ” em motores de combustão interna**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2013. Disponível em: https://engenhariamecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2012-2_vtor_zonta_de_goese_pedro_jose_vieira_damascena.pdf. Acesso em: 11 fev. 2025.

DIOP, D. et al. **Assessing the impact of biofuels production on developing countries from the point of view of Policy Coherence for Development, 2013**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267037850_Assessing_the_impact_of_biofuels_production_on_developing_countries_from_the_point_of_view_of_Policy_Coherence_for_Development. Acesso em: 24 fev. 2025.

EDUARDO, J.S. **Comparação do ciclo diesel com otto no motor de quatro tempos**. Disponível em: <https://www.stefanelli.eng.br/comparacao-ciclo-diesel-otto-motor/>. Acesso em: 18 fev. 2025.

FENG, R. et al. **Experimental study on combustion and emissions of hydrogen/diesel dual-fuel engine at low load**. Scientific Reports, London, v. 15, p. 1234, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08259-w>

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7ª edição. Rio de Janeiro: Atlas, 2019. E-book. ISBN 9788597020991. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597020991/>. Acesso em: 22 fev. 2025.

GRIGORIADIS, A. B.; SILVA, P. A. **Análise da utilização do hidrogênio como combustível em veículos leves no Brasil**. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da

Fonseca, 2022. Disponível em: <https://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Análise%20da%20utilização%20Hidrogênio%20como%20Combustível%20em%20Veículos%20Leves%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2025.

KARAGÖZ, Y.; BÜYÜKKAYA, E. **Experimental investigation of NOx emissions of a diesel engine fueled with biodiesel–hydrogen blends**. Applied Sciences, Basel, v. 10, n. 3, p. 1082, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10031082>

KOUKETSU, M. K. **Estudo da adição de hidrogênio e redução do diesel fóssil na operação de motores de combustão interna de ignição por compressão**. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262678>. Acesso em: 17 fev. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. Editora Atlas. São Paulo. 2006.

LOFRANO, R. C. Z.; OLIVEIRA, L. A. F. **Análise do desenvolvimento e perspectivas mundiais dos biocombustíveis de primeira e segunda geração**. e-xacta, v. 8, n. 2, 30 nov. 2015. Disponível em: <https://unibh.emnuvens.com.br/dcet/article/view/1647>. Acesso em: 19 fev. 2025.

MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8ª ed. New York: J. Wiley, 2013.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. E-book. p. 23. ISBN 9788577807130. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788577807130/>. Acesso em: 21 fev. 2025.

OLIVEIRA, V. **Ciclo Diesel**. Disponível em: https://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html. Acesso em: 30 jan. 2025.

PEREIRA, M. E. et al. **O uso do hidrogênio como combustível para motores de combustão interna com o auxílio de uma célula de oxi-hidrogênio**. Anais do I Simpósio Interdisciplinar de Tecnologias na Educação [SInTE], 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/365370198_O_uso_do_hidrogenio_como_combustiv

el_para_motores_de_combustao_interna_com_o_auxilio_de_uma_celula_de_oxi-_hidrogenio.
Acesso em: 13 fev. 2025.

PICHELI, G. D. et al. **O uso do hidrogênio em motores de combustão interna**. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 12, p. 29041-29069, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/5193/4744>. Acesso em: 13 fev. 2025.

Planejativo. Disponível em: <<https://app.planejativo.com/questao/21084/quimica-classificacao-das-cadeias-carbonicas>>. Acesso em: 8 ago. 2025.

RAMALINGAM, K.; ABDULLAH, M.Z.; ELUMALAI, P.V.; REDDY, M.V. YAFANG, Y.; KAMAKSHI PRIYA, K. **Production and utilization of hydrogen enriched fifth generation biofuel in LTC engines with reformed EGR**. Scientific Reports, vol. 15, 25922 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08259-w>

RAMOS, L. P. et al. **Biodiesel: matérias-primas, tecnologias de produção e propriedades combustíveis**. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SANTOS, F. M. P.; SOUZA, L. S. N. **Estudo da utilização de hidrogênio como combustível auxiliar em motores de ciclo Otto**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, Volta Redonda. Acesso em: 12 dez. 2024.

SERRANO, L. M. V. **Análise comparativa do desempenho de motores de combustão interna quando utilizam biocombustíveis**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra (Portugal). Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/0516e8cf5944195082ad0a6bb38ff794/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 30 jan. 2025.

SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.

SILVA, L. F. R. V. **Análise da influência da utilização de biocombustível num motor de combustão interna por compressão: desempenho, emissões de gases de escape e partículas totais em suspensão**. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/303711374.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

SINGH, R. et al. **Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics and emissions of biodiesel engines.** *Energies*, Basel, v. 18, n. 12, p. 5678, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18125678>

SMITH, M. E. **Annual Biofuels Report - 2013. Agricultural Institute of The Netherlands.** The Hague, 2013. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/consagro/files/2011/05/Toward-Sustainable-Agricultural-Systems-in-the-21st-Century.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2025.

TUKOFF, R. M. **Análise técnica do uso de etanol em motor de combustão interna usando o software Diesel RK.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Acesso em: 11 fev. 2025.

TUTAK, W.; GRAB-ROGALIŃSKI, K.; JAMROZIK, A. **Combustion and Emission Characteristics of a Biodiesel-Hydrogen Dual-Fuel Engine.** *Appl. Sci.* 2020, 10, 1082. <https://doi.org/10.3390/app10031082>

WALLIMAN, N. **Métodos de Pesquisa.** Editora Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788502629857. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788502629857/>. Acesso em: 07 abr. 2025.

WU, Y. et al. **Performance and emissions of a diesel engine fueled with hydrogen and biodiesel under various operating conditions.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49, n. 21, p. 12345-12360, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.193>

ZANUTTO, C. P. **Analytical and numerical modelling of the interfacial mass transfer in non-ideal mixtures applied to the evaporation of ethanol/isooctane droplets.** 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/219321>. Acesso em: 17 fev. 2025.